# الفصل الثالث

## تفاعل الإشعاعات المتبادل مع المادة
## Interaction of radiation with matter

مقدمة – التفاعل المتبادل بين الجسيمات المشحونة الثقيلة والمادة – التفاعل المتبادل بين الإلكترونات والمادة – التفاعل المتبادل بين إشــعاعات جامــا والمادة – التفاعل المتبــادل بــين النيوترونـــات والمادة – أسئلة ومسائل.

### 3-1 مقدمة

يتعرض هذا الفصل للتفاعل المتبادل بين الإشــعاعات والمــادة. والمقصود بكلمة الإشعاعات هنا هو جميع أنواع الإشعاعات كالجسيمات المشحونة الثقيلة (جسيمات ألفا والديوترونات والبروتونات)، والجسيمات المشحونة الخفيفة كالإلكترونـــات والبوزيترونـــات، وإشــعاعات جامــا والأشعة السينية، والنيوترونات. ولا يتعرض هذا الفصــل للتفــاعلات النووية التي قد تحدثها الإشعاعات في المادة ولكنه يقتصر على دراســة التأثير الجهري (الماكروسكوبي) المتبادل بين الإشعاعات والمادة مثــل امتصاص الإشعاعات في المادة أو اختراقها لها. ونظرا لاختلاف هــذه التأثير باختلاف نوع الإشعاعات واختلاف طاقاتها فسوف يدرس التأثير كل نوع على حدة.

### 3-2 التفاعل المتبادل بين الجسيمات المشحونة والمادة
### Interaction of heavy charged particles with matter

#### 3-2-1 انتقال الطاقة بين الجسيمات للمادة The energy transfer

عند سقوط الجســيمات المشــحونة الثقيلــة، كجســيمات ألفــا والديوترونات والبروتونات وغيرها، على المــادة تنتقــل طاقــة هــذه

الجسيمات إلى المادة بالتدريج إلى أن تتوقف الجسيمات الساقطة. ويتم هذا الانتقال أساسا عن طريق التصادمات غير المرنة (inelastic collision) مع إلكترونات ذرات المادة التي تمر خلالها الجسيمات. وينتج عن هذه التصادمات بين الجسيمات المشحونة الساقطة والإلكترونات إثارة لهذه الذرات ( أي انتقال أحد إلكترونات الذرة من مداره إلى مدار آخر ذي طاقة أعلى ) أو تأينها (أي انفصال إلكترون عن ذرته تماما). وهكذا يحدث تأين ابتدائي لذرات المادة وهو ذلك التأين الناتج عن الجسيمات الثقيلة ذاتها. ويمثل هذا التأين الابتدائي حوالي 30 % من إجمالي التأين الناتج عن توقف الجسيم المشحون في المادة. وأما النسبة الباقية وهي حوالي 70 % من إجمالي التأين فتعرف بالتأين الثانوي، وهو ناتج عن إلكترونات التأين الابتدائي التي تنطلق بسرعات عالية نسبيا، فتؤدي بدورها إلى تأين المادة . وتسمى الإلكترونات الثانوية باسم إلكترونات دلتا (δ- electrons) .

وهكذا، تفقد الجسيمات المشحونة الثقيلة طاقتها بالتدريج مع تغلغلها داخل المادة وتقل بالتالي سرعاتها إلى أن تصبح قريبة من سرعة إلكترونات المدار K لذرة الجسيم الساقط، فيحدث عندئذ تبادل بين الإلكترونات المدارية لذرات المادة وإلكترونات التأين الناتجة عن الجسيم الساقط. وقد يصل عدد هذه التبادلات إلى $10^3$ مرة قبل أن يتحول الجسيم الساقط إلى ذرة متعادلة.

وهكذا، يتكون نتيجة لتأين الذرة الواحدة زوج إلكتروني– أيوني. ويمكن قياس العدد الكلي n للأزواج الإلكترونية – الأيونية الناتجة عن كل من التأين الابتدائي والثانوي، وذلك باستخدام الطرق التجريبية المختلفة. وبمعرفة كل من طاقة الجسيمات المشحونة الساقطة E وعدد الأزواج n فإنه يمكن حساب القيمة المتوسطة $\bar{W}$ للطاقة اللازمة لتكوين زوج إلكتروني – أيوني واحد من العلاقة التالية:

$$\bar{W} = E / n \qquad (3\text{-}1)$$

ولقد وجد أن قيمة $\bar{W}$ اللازمة لتكوين زوج واحد تعتمد اعتمادا واضحا على نوع المادة ولكنها لا تعتمد على طاقة الجسيمات الساقطة أو

على طبيعة هذه الجسيمات. كما وجد أن قيمة W تكون صغيرة جدا فهي تساوي 35 إلكترون فولت بالنسبة للهواء في الظروف المعيارية من الضغط ودرجة الحرارة. وهذا يعني أن الجسيمات الساقطة تتعرض لعدد كبير للغاية من التصادمات قبل أن تتوقف. وعند فقد هذه الكمية الصغيرة من الطاقة في كل تصادم فإن الجسيمات الساقطة لا تغير اتجاه مسارها، وهذا هو السبب في أن أثر (the track) الجسيمات المشحونة الثقيلة في المادة يكون عبارة عن خط مستقيم. كذلك، يلاحظ أن طول الأثر للجسيمات المشحونة الثقيلة يعتمد على طاقة هذه الجسيمات ونوعها ونوع المادة. وبالنسبة للنوع نفسه من الجسيمات والمادة تكون أطوال آثار الجسيمات المشحونة الثقيلة واحدة تقريبا طالما كانت طاقاتها واحدة.

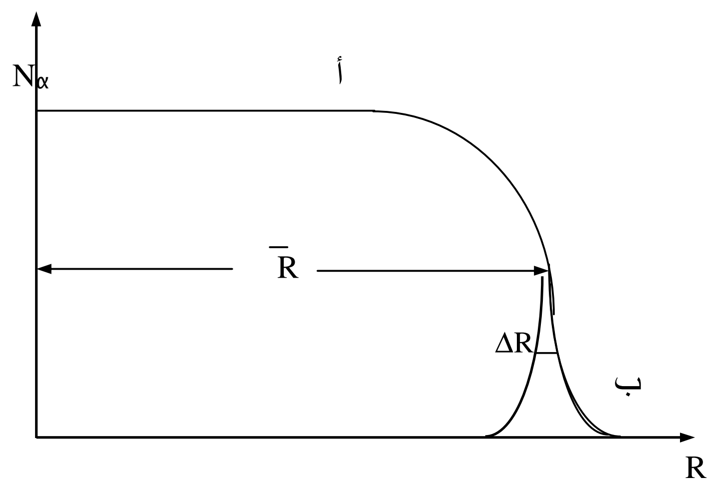
وتجدر الإشارة إلى أن الجسيمات المشحونة الساقطة تتفاعل مع نوى المادة التي تمر خلالها. إلا أن هذا التفاعل يعتبر مهملا كوسيلة من وسائل فقد الطاقة حيث أن احتمال التصادم مع النوى أقل بكثير جدا من احتمال التصادم مع الإلكترونات.

## 2-2-3 مدى الجسيمات المشحونة الثقيلة

**Range of heavy charged particles**

مدى الجسيم المشحون في مادة ما هو عبارة عن طول المسافة المستقيمة التي يقطعها الجسيم، في اتجاه سقوطه، في هذه المادة. ولما كان أثر الجسيم الثقيل عبارة عن خط مستقيم فإن مدى الجسيم الثقيل هو نفسه عبارة عن أثر هذا الجسيم في المادة. وقد ذكر في البند السابق أن طول الأثر للجسيمات المعينة يكون واحدا تقريبا طالما كانت طاقتها الابتدائية واحدة. ولكن يجب ملاحظة أن تصادم الجسيم الساقط مع الإلكترونات عملية إحصائية بحتة. فقد تختلف المسافة بين التصادمات، وبالتالي، يختلف طول الأثر اختلافا طفيفا، مما يؤدي إلى حدوث اختلاف طفيف في المدى للجسيمات من النوع نفسه وذوي الطاقة الواحدة. ويعرف هذا الاختلاف أو التراوح في مدى الجسيمات ذات الطاقة الواحدة بالتبعثر في المدى (straggling).

وعند قياس مدى جسيمات ألفا في الهواء (وذلك بقياس عدد جسيمات ألفا التي تسجل عند مسافات مختلفة من مصدر هذه الجسيمات، شريطة أن تكون جسيمات ألفا الخارجة من المصدر في شكل حزمة ضيقة ومتوازية)، تكون الصورة كالمبينة في شكل (3−1) بالمنحنى (أ). وبتفاضل هذا المنحنى ينتج منحنى جديد (ب) يعرف باسم المنحنى التفاضلي للتبعثر، وهو يوضح طبيعة التبعثر في المدى. ويسمى المقدار R المبين بالشكل بالمدى المتوسط (mearange). ويعتبر نصف العرض $\Delta R$ للمنحنى ب ، الذي يقاس ( $1 / e = 1 / 2.71$ ) من أقصى ارتفاع لهذا المنحنى وسيطا مهما لقياس قيمة التبعثر. فكلما زاد $\Delta R$ كان التبعثر في المدى كبيرا والعكس صحيح.




شكل(3−1)
أ− مدى جسيمات α في الهواء
ب− المنحنى التفاضلي للتبعثر

ولقياس مدى الجسيمات الثقيلة في الغازات أو الأجسام الصلبة فإنه يفضل تثبيت كل من المصدر والكاشف على مسافة مناسبة في حيز مفرغ من الهواء الجوي ثم يتم إدخال الغاز المعين بضغوط مختلفة،

ويحسب عدد الجسيمات التي تسجل في الكاشف عند كل ضغط. ويــزاد الضغط حتى يتوقف الكاشف عن تسجيل الجسيمات. وترسم العلاقة بين معدل العد وضغط الغاز فنحصل على منحنى مشابها للمنحنـــى (أ). ثــم تحول الضغوط المختلفة عند مسافة مسافة ثابتة إلى مسافات مختلفة عند ضغط ثابت مساو للظروف الطبيعية، فنحصل على علاقة بين معدل العد N والمسافة R كالمبينة في شكل (3–1). والسبب في اتباع ذلك الأسلوب هو المحافظة على قيمة زاوية رؤية الكاشف للمصدر ثابتة. أما بالنســبة للمواد الصلبة فيقاس المدى بعد تثبيت كل من المصدر والكاشف في حيز مفرغ ثم يوضع سُمك صغير من المادة أولا ويزداد السمك بالتدريج إلى أن يتوقف الكاشف تماما عن العد. ثم ترسم العلاقة بــين معــدل العــد والسمك المقابل للمادة.

## 3–2–3 التأين النوعي وقدرة الإيقاف

**The specific ionization and the stopping power**

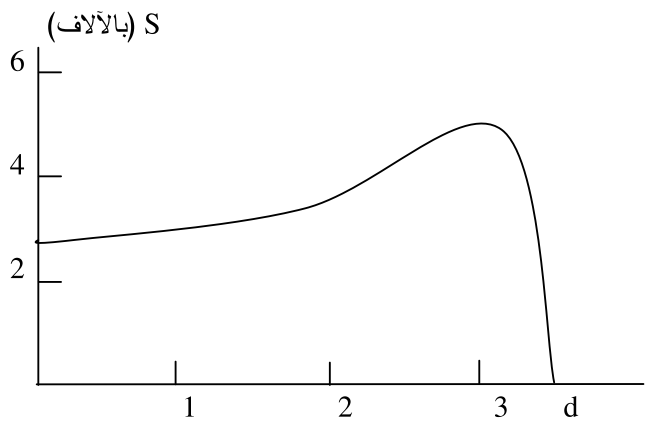
### The specific ionization S التأين النوعي

يعرف التأين النوعي S على أنــه عــدد الأزواج الإلكترونيــة – الأيونية المتكونة خلال ملليمتر واحد من الأثر في الهواء الجــوي عنــد درجة حرارة 15° مئوية وضغط مساو 760 مم زئبق. وتصل قيمــة S بالنسبة لجسيمات ألفا عدة آلاف زوج لكل ملليمتر من الأثر، وذلك عندما تكون طاقة جسيمات ألفا في حدود عدة ميغا إلكترون فولت.

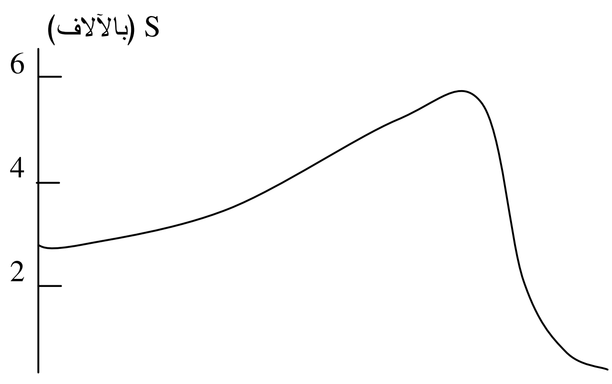
وعند رسم العلاقة بين التأين النوعي S لجسيم واحد من جسيمات ألفا وبين المسافة من مصدر هذا الجسيم نحصل على علاقة كالمبينة في شكل (3–2). ويبين هذا الشكل أن التأين النوعي يكون صغيرا عنــدما يكون جسيم ألفا في بداية الأثر أي عندما تكون طاقته مازلــت كبيــرة. ويزداد التأين النوعي بالتدريج إلى أن يصل إلى أقصى قيمة له عنــدما يصبح جسيم ألفا في نهاية الأثر أي عندما تصبح طاقته صــغيرة جــدا. ويرجع السبب في ذلك إلى أن زمن تعرض إلكترونـــات ذرات المـــادة للمجال الكهربي للجسيم يصبح طويلا نسبيا عندما تنخفض سرعة هــذا

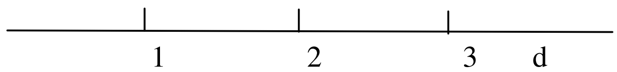
الجسيم، أي عندما تقل طاقته. وزيادة زمن التعرض يؤدي بالتالي إلــى زيادة احتمال التأين.

وعند رسم العلاقة بين التأين النــوعي S وبــين المســافة مــن المصدر بالنسبة لحزمة متوازية من جسيمات ألفا نحصل على منحنــى كالمبين في شكل (3−3). وهذا المنحنى يختلف اختلافا طفيفا عن سابقه عند نهاية الأثر. ويرجع السبب في هذا الاختلاف إلى التبعثر. ويعــرف هذا المنحني الأخير بمنحنى براغ (Bragg curve) للتأين النوعي.




شكل (3−2) :العلاقة بين التأين النوعي S لجسيم واحد من جسيمات ألفا وبين المسافة من مصدر الجسيم






شكل (3−3): منحنى براغ للتأين النوعي

**قدرة الإيقاف The stopping power ( - dE/dx)**

هي عبارة عن معدل فقد الجسيم المعين ذي الطاقة المعينة لطاقته داخل المادة. والإشارة السالبة تعني فقد الطاقة كلما زادت مسافة التغلغل في المادة. وترتبط قدرة الإيقاف بالتأين النوعي S بالعلاقة التالية:

$$( - dE / dx) = \overline{W} . S \qquad (3\text{-}2)$$

حيث $\overline{W}$ هي القيمة المتوسطة للطاقـــة اللازمـــة لتكـــوين زوج إلكتروني _ أيوني. ومن هذه العلاقة الأخيرة يمكن تعريف قدرة الإيقاف على أنها كمية الطاقة التي يفقدها الجسيم في ملليمتر واحد مـــن الأثـــر. ولما كانت S تعتمد على طاقة الجسيم ونوعه، $\overline{W}$ تعتمد على نوع المادة، فإن قدرة الإيقاف تعتمد على كل من نوع الجسيم وطاقته ونوع المادة.

ولقد تمكن هانز بيتي (H.Bethe) من اشتقاق العلاقة النظرية لقـــدرة الإيقاف المتوسطة لكل 1 سم من المادة، وهي:

$$(-dE /dx) = (4\pi e^4 z^2 / m_0 v^2)\, ZN\, [\ln ( 2m_0\, v / I )_v - \ln(1-v^2/c^2) - v^2 /c^2 ] \qquad (3\text{-}3)$$

حيث z ، v هما شحنة وسرعة الجسيم الساقط، $m_0$ هـــي كتلـــة الإلكترون عند السكون، N هو عدد ذرات المادة لكل اسم$^3$ ، Z هو العدد الذري للمادة، I هو متوسط كمون (الجهد) التأين لذرات هذه المـــادة و c هي سرعة الضوء في الفراغ. فإذا كانت طاقة الجسيمات الثقيلة الساقطة صغيرة ( أي حدود عدة عشرات من الميغا إلكتـــرون فولـــت ) تكـــون سرعتها صغيرة بالنسبة لسرعة الضوء وبالتالي يمكن اعتبار أن النسبة بين سرعة الجسيم وسرعة الضوء تساوي صـــفر( $v / c = 0$ ) ، عندئـــذ تعطى قدرة الإيقاف المتوسطة بالعلاقة:

$$( - dE/dx) = ( 4\pi e^4 z^2 / m_0\, v^2 )\, N\, Z \ln ( 2m_0\, v / I )$$

$$= \; ( 4\pi e^4 z^2 / m_0 v^2 ) \; N \; B \qquad (3\text{-}4)$$

حيث

$$B \; = \; Z \ln ( 2m_0 \, v / I )$$

وتجدر الإشارة إلى أن العلاقتـــين (3−3)، (3−4) لا تصـــلحان للاستخدام عند الطاقات الصغيرة جدا حيث يحدث تبادل الإلكترونات بين المادة والجسيم. كذلك، فإن قيمة I الواردة في العلاقتين يجب تحديـــدها تجريبيا.

وفي الأغراض العلمية يفضل اتخاذ قيمة فيزيائية أخـــرى تعـــرف باسم قدرة الإيقاف النســـبية (Relative Stopping Power RSP) . وقـــدرة الإيقاف النسبية لمادة ما هي عبارة عن النسبة بـــين مـــدي الجســـيمات المعينة في الهواء عند الظروف المعيارية ومدى نفس الجســـيمات فـــي المادة.

وباستخدام العلاقة (3−4) لكل من الهواء والمادة نجد أن

$$RSP = ( - dE / dx )_{air} / (-dE/dx)_{abs} = N_{air} \; B_{air} / N_{abs} \; B_{abs} \quad (3\text{-}5)$$

حيث air تعود على الهواء، abs تعود علـــى المـــادة الممتصـــة للطاقة.

وعندما تكون المادة في شكل مركب كيميائي لعدة عناصـــر فإنـــه يجب إيضاح أن طاقة الروابط الكيميائية بين العناصر المختلفـــة تعتبـــر مهملة ولا تشكل أي أثر على قدرة الإيقاف للمادة المكونـــة مـــن عـــدة عناصر. لذا، فإنه عندما تكون المادة الممتصة في شكل مركب كيميائي تعتبر قدرة الإيقاف في المركب مساوية لمجموع قدرات الإيقاف في كل مادة على حدة مع الأخذ في الاعتبار نسب المواد في المركـــب، أي أن قدرة الإيقاف في المادة المركبة هي:

$$(- dE/dx)_{comp} = (N_1/N_0) \, (-dE/dx)_1 + (N_2/N_0)_2 \, (-dE/dx)_2 + \ldots\ldots \qquad (3\text{-}6)$$

حيث $(-dE/dx)_{comp}$ هي قدرة الإيقاف للمادة المركبة، $(-dE/dx)_1$، $(-dE/dx)_2$ ،... هي قدرات الإيقاف في المواد الأولى والثانية، و.... المكونة لهذا المركب، $N_0$ هو عدد ذرات المركب لكل ا سم$^3$ و $N_1$ , $N_2$ عدد ذرات المادة الأولى والثانية لكل سم$^3$.

وباستخدام العلاقة (3−4) يمكن إيجاد العلاقة بين قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا والبروتونات في المادة نفسها، حيث نجد أن:

$$\{ (-dE/dx)_{\alpha\,(4E)} / (-dE/dx)_{p\,(E)} \} = 4 \qquad (3\text{-}7)$$

وتعني هذه العلاقة أن قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا أكبر بمقدار أربعة أضعاف من قدرة الإيقاف للبروتونات التي طاقتها تساوي ¼ طاقة جسيمات ألفا، وذلك عند استخدام المادة نفسها. فمن المعروف أن مدى جسيمات ألفا في الهواء يساوي 3.5 سم إذا كانت طاقتها حوالي 5 ميغا إلكترون فولت. وبذلك، يكون مدى البروتون الذي تبلغ طاقته $5 \div 4 =$ 1.25 ميغا إلكترون فولت، هو $3.5 \times 4 = 14.0$ سم عند الظروف نفسها من الضغط والحرارة. ويوضح هذا المثال أن قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا كبيرة (أي أن مداها قصير). وتقل هذه القدرة كلما صغرت كتلة الجسيم أو شحنته.

وتجدر الإشارة إلى أنه يمكن تحديد المدى بدلالة قدرة الإيقاف، وذلك طبقا للعلاقة التالية:

$$R = \int_0^R dx = \int_0^E dE/(-dE/dx) \qquad (3\text{-}8)$$

وتعرف هذه المعادلة بالعلاقة بين المدى والطاقة (range - energy relation) ، وعند التعويض عن قدرة الإيقاف من العلاقة (3−4) فإنه يمكن إيجاد قيمة المدى. ولكن هذه القيمة تكون غير دقيقة حيث أن العلاقة (3−4) لا تصلح للاستخدام عن نهاية المدى.

## 3−3 التفاعل المتبادل بين الإلكترونات والمادة

Interaction of electrons with matter

## 3-3-1 انتقال الطاقة من الإلكترون للمادة

عندما تكون طاقة الإلكترونات الساقطة ( أقل من ½ ميغا إلكترون فولت) تفقد هذه الإلكترونات طاقاتها عن طريق إثارة الإلكترونات المدارية لذرات المادة أو تأيين هذه الذرات بنفس أسلوب انتقال الطاقة من الجسيم الثقيل إلى المادة. وتبلغ نسبة التأين الابتدائي في حالة الإلكترونات حوالي 20 % والباقي ناتج عن التأين الثانوي. ونظرا لأن كتلة الإلكترون صغيرة للغاية بالنسبة لكتلة الجسيم الثقيل تكون سرعة الإلكترونات كبيرة للغاية بالمقارنة بسرعة الجسيم الثقيل الذي يكون له نفس الطاقة. وهذا يعني أن زمن بقاء الإلكترون بالقرب من ذرة معينة من ذرات المادة يكون صغيرا للغاية، مما يؤدي إلى انخفاض التأين النوعي S . فإذا كان التأين النوعي لجسيمات ألفا يبلغ عدة آلاف في بداية الأثر ويتضاعف عند نهايته، فيلاحظ أن التأين النوعي للإلكترونات لا يتعدى 10 في بداية الأثر ويصل إلى حوالي المائة عند نهايته.

وطبقا لقوانين بقاء الطاقة والزخم (حفظ الطاقة والزخم ) فإنه عند تصادم الجسيم الثقيل مع إلكترون المادة تنتقل نسبة ضئيلة جدا من طاقة الجسيم إلى الإلكترون لا تتجاوز $4m_0 / M$ ، حيث M كتلة الجسيم الثقيل. أما عند تصادم الإلكترون الساقط مع إلكترون المادة فيمكن أن تصل قيمة الطاقة المنتقلة من الإلكترون الساقط إلى إلكترون المادة نصف طاقة الإلكترون الساقط في التصادم الواحد. أي أنه في حالة الإلكترونات هناك احتمال لانتقال كمية كبيرة من طاقة الإلكترون الساقط في التصادم الواحد إلى أحد الإلكترونات المدارية. ويؤدي هذا إلى زيادة التبعثر في حالة الإلكترونات، بحيث يكون، عادة، أكبر بكثير من التبعثر في حالة الجسيمات الثقيلة. وبالإضافة إلى ذلك فإنه نظرا لصغر كتلة الإلكترون فإن التصادمات بين الإلكترون الساقط وإلكترونات ونوى المادة قد تؤدي إلى انكسار مسار الإلكترون الساقط. لذا يكون أثر الإلكترون الساقط في المادة عادة عبارة عن خط منكسر.

وعند زيادة طاقة الإلكترونات الساقطة فإنه بالإضافة إلى فقد الطاقة عن طريق التصادمات غير المرنة ( إثارة وتأين ذرات المادة)

يمكن أن تفقد الإلكترونات الساقطة طاقتها في صورة إشعاعات تعــرف باسم إشعاعات الانكباح (bresmsstrahlung radiation). وتقــوم العمليــة الأخيرة (أي فقد الطاقة بالإشعاع) بالدور الأساســي فــي فقــد طاقــة الإلكترونات الساقطة كلما زادت طاقة هذه الإلكترونات .

وتفقد البوزيترونات طاقتها بالأسلوب نفسه. إلا أنه يوجد فــرق جوهري بين البوزيترونات والإلكترونات عند نهاية الأثر. فبعد أن يفقد البوزيترون طاقته عند نهاية الأثر فإنه عند اصطدامه بإلكترون يفنيــان معا ( الإلكترون والبوزيترون) مكونين بذلك فوتونين من فوتونات جاما، وهي الظاهرة المعروفة بتلاشي المادة والمادة المضادة عنــد تلاقيهمــا (annihilation) .

## 3-3-2 فقد الطاقة بالتصادمات غير المرنة

**Energy loss by inelastic collision**

لا تختلف نظريات انتقال الطاقة في حالة الإلكترونات عن طريق التصادمات غير المرنة (الإثارة والتأين) عن مثيلاتها بالنسبة للجسيمات المشحونة الثقيلة. ويمكن الحصول على القيمة النظرية لقــدرة الإيقــاف للإلكترونات عندما تكون طاقتها صغيرة ($E < m_0C^2$) بالمقارنــة بطاقــة السكون لها، وذلك من العلاقة التالية:

$$( - dE/dx) = ( 4\pi e^4 / m_0 v^2 ) N Z [\ln (m_0 v^2 /2 I ) + 0.15] \quad (3\text{-}9)$$

أما إذا كانت طاقة الإلكترونات كبيرة ( $E > m_0c^2$ ) تكون القيمــة النظرية لقدرة الإيقاف هي:

$$(- dE/ dx) = ( 2\pi e^4 / m_0 c^2 ) N Z [\ln (m_0 c^2 /2 I ) + 0.15] \quad (3\text{-}10)$$

## 3-3-3 فقد الطاقة بالإشعاع **Energy loss by radiation**

طبقا لقوانين الكهروديناميكا، فإنه عند تعجيل (تســريع) جســيم مشحون فإن هذا الجسيم يصدر إشعاعات كهرومغناطيسية تتناسب شدتها مع مربع العجلة (التسارع). وعند مرور إلكترون بــالقرب مــن نــواة

شحنتها Z فإن مساره ينحرف. وهذا الانحراف هو بمثابة التعجيل. وينتج عن هذا التعجيل إشعاعات كهرومغناطيسية تعرف باسم إشعاعات الانكباح، تؤدي إلى فقد الإلكترون لجزء من طاقته. ولا يحدث هذا الفقد للطاقة على نواة الذرة فحسب، وإنما يحدث كذلك على الإلكترونات المدارية للذرة. وطيف إشعاعات الانكباح طيف مستمر، وهي تصاحب تفكك بيتا كما تصدر عن جميع أنابيب الأشعة السينية عند فقد الإلكترونات لطاقتها على مادة المصعد ( الأنود).

ولحساب الطاقة التي يفقدها إلكترون في شكل إشعاع انكباح على وحدة الطول من المسار داخل المادة تستخدم العلاقة التالية:

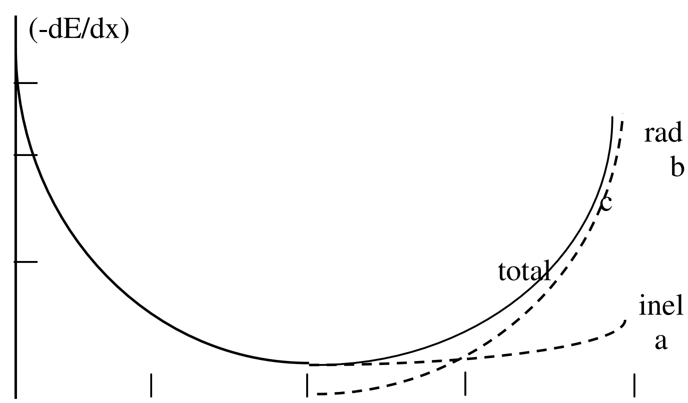
$$(-\,dE/dx)_{rad} = [4Z(Z+1)e^4\,NE\,/137\,m_0^2\,C^2]\,(\ln 183Z^{-1/2} + 0.125) \qquad (3\text{-}11)$$

وهذه العلاقة التي تمثل قدرة الإيقاف عن طريق الإشعاع صالحة مادامت طاقة الإلكترونات كبيرة، أي ($E >> m_0\,c^2$). أما إذا كانت طاقة الإلكترونات صغيرة فإنه يمكن إهمال فقد الطاقة عن طريق الإشعاع.

وهكذا فإن قدرة الإيقاف الكلية بالنسبة للإلكترونات هي:

$$(-\,dE/dx)_{tot} = (-\,dE/dx)_{inel} + (-\,dE/dx)_{rad} \qquad (3\text{-}12)$$

ويوضح شكل (3–4) كيفية تغير قدرة الإيقاف عن طريق التصادمات غيرالمرنة $(-dE/dx)_{inel}$ وعن طريق الإشعاع $(-dE/dx)_{rad}$ وكذلك القدرة الكلية $(-dE/dx)_{tot}$ كدالة من طاقة الإلكترونات الساقطة،



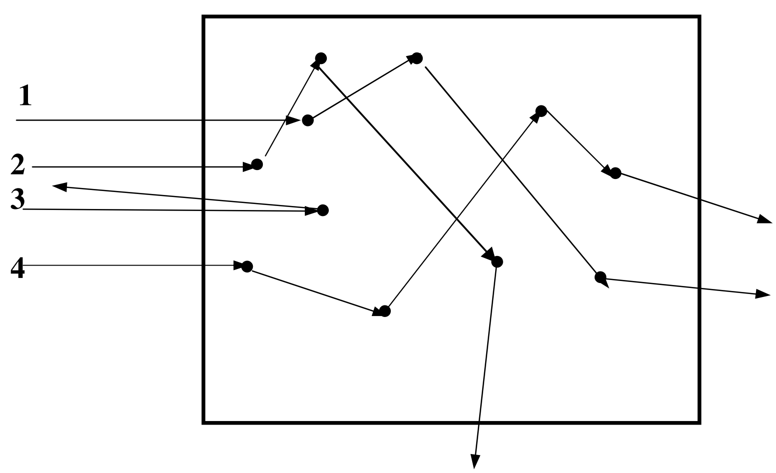



شكل (3-4)
تغير قدرة الإيقاف كدالة من طاقة الإلكترونات الساقطة

حيث يمثل المحور الأفقي نسبة طاقة الإلكترونات الساقطة E إلى طاقة السكون للإلكترون $m_0c^2$ ، ويمثل المنحنى a قدرة الإيقاف بالتصادمات غير المرنة والمنحنى b قدرة الإيقاف بالإشعاع أما منحنى c المستمر فيمثل القدرة الكلية للإيقاف.

### 4-3-3 امتصاص الإلكترونات **Absorption of electrons**

لاحظنا أن سلوك الإلكترونات عندما تسقط على المادة يختلف اختلافا كبيرا عن سلوك الجسيمات الثقيلة. وتتمثل بعض نواحي هذا الاختلاف في أن أثر الإلكترون في المادة لا يكون على شكل خط مستقيم كما هو الحال بالنسبة للجسيمات الثقيلة ولكن يكون في صورة كالمبينة بشكل(3-5) ، بالإضافة إلى ذلك فإن طول أثر الإلكترون يختلف كليا عن مداه ( فالمدى عبارة عن المسافة المستقيمة التي يقطعها الجسيم في اتجاه سقوطه حتى يتوقف ). لذا، فإن مفهوم المدى بالنسبة لإلكترون معين غير وارد.



شكل (3-5)
أثر الإلكترونات في المادة

وهكذا فإنه عند سقوط حزمة متوازية من الإلكترونات ذات طاقة واحدة على مادة ما (تسمى بالمادة الماصة (absorber) ، وإذا كان سمك هذه المادة غير كاف لامتصاص هذه الإلكترونات، فإن الإلكترونات تخرج من الجانب الآخر للمادة بطاقات مختلفة اختلافا كبيرا. أي أن التبعثر الناتج في طاقات الإلكترونات يكون كبيرا للغاية بمقارنته بنظيره في حالة الجسيمات الثقيلة. وعموما يزداد التبعثر بزيادة سمك المادة الممتصة. بالإضافة إلى ذلك يمكن أن تكون زاوية التشتت الناتجة عن التصادم كبيرة بحيث يرتد الإلكترون إلى الخلف (الإلكترون رقم 3 في شكل 3-5). وتعرف هذه الظاهرة الأخيرة بالتشتت الارتدادي أو التشتت للخلف (back scattering ). ويمكن أن يؤدي هذا التشتت الارتدادي إلى زيادة الشدة الإشعاعية المقيسة لمصادر بيتا عن الشدة الفعلية، وذلك عند وجود أجسام سميكة بالقرب من المصدر. لذا، يجب تقدير قيمة التشتت الارتدادي بعناية عند تحديد القيمة الحقيقية لشدة المصدر.

### قانون الامتصاص

لما كانت أطياف بيتا الصادرة عن جميع النظائر المشعة هي أطياف مستمرة، ونظرا لما يحدث من تشتت للإلكترونات في المادة فإنه ينتج عن هذين العاملين حدوث امتصاص لهذه الجسيمات داخل المادة بطريقة أسية. ولقد وجد عمليا أن قانون الامتصاص لجسيمات بيتا يمكن كتابته بالتقريب المناسب في الصورة الآتية:

$$N = N_0 e^{-\mu x} \qquad (3\text{-}13)$$

حيث: $N_0$ هو عدد جسيمات بيتا الساقطة و $N$ هو عدد الجسيمات بعد اختراق سمك من المادة الماصة مقداره $x$ أما $\mu$ فيعرف بمعامل الامتصاص الخطي ( linear absorption coefficient) ، وهو يعتمد أساسا على نوع المادة الماصة ويزيد بزيادة عددها الذري ووحدته سم$^{-1}$ .

وعند قسمة معامل الامتصاص الخطي $\mu$ على كثافة المادة $\rho$ الماصة نحصل على معامل جديد $\mu_m$ يعرف باسم معمـــل الامتصـــاص الكتلـــي (mass absorption coefficient)، أي أن:

$$\mu_m = \mu / \rho$$

ووحدة قياس معامل الامتصاص الكتلي هي سم$^2$/جـــرام، وهـــذا المعامل الأخير يختلف اختلافا طفيفـــا بـــاختلاف النســـبة Z/A للمـــادة الماصة. وعند استخدام معامل الامتصاص الكتلي في المعادلـــة (3−13) يجب التعبير عن السمك $x$ بوحدة جديدة $x_m$ تعبر عن السمك الكتلـــي وهي وحدة (جرام/سم$^2$) بدلا من السنتيمتر، أي أن:

$$x_m = x \rho$$

ولذلك، يلزم أن تكون وحدة $x \rho$ في هذه الحالة سم$^2$/جم

**السمك النصفي The half-thickness $x_{1/2}$**

يستخدم مصطلح السمك النصـــفي $\chi x_{1/2}$ (the half-thickness) أو طبقة السمك النصفي (The half value layer HVL) استخداما واسعا عند حساب امتصاص الإلكترونات. والسمك النصفي عبـــارة عـــن الســـمك المعين من المادة الذي يحدث خلاله امتصاص نصف عـــدد الجســـيمات الساقطة ويخترق النصف الآخر، أي أنه ذلك السمك الذي يـــؤدي إلـــى خفض الشدة الإشعاعية أو عدد الجسيمات التي تخترقه إلى النصف، أي أن:

$$N = ½ N_0$$

وباستخدام العلاقة (3−13) نجد أن:

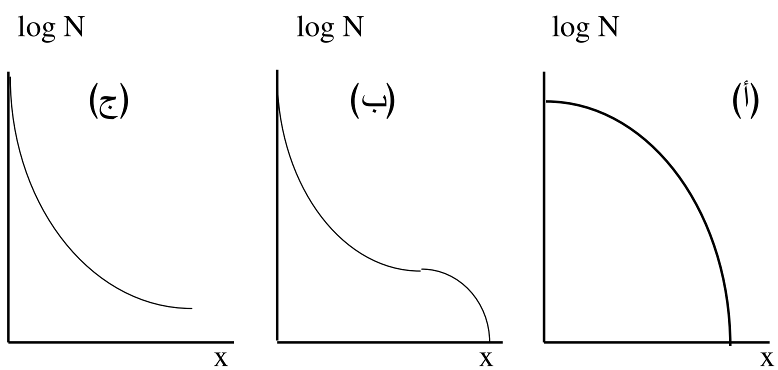
$$x_{1/2} = \ln 2 / \mu = 0.693 / \mu \text{ (cm)} \qquad (3\text{-}15)$$

$$x_{m1/2} = \ln 2 / \mu_m = 0.693 \rho / \mu \text{ gm/ cm}^2) \qquad (2\text{-}16)$$

## 3−3−5 تحديد مدى الإلكترونات من منحنى الامتصاص

**Range determination from the absorption curve**

ذكرنا أن مفهوم المدى لإلكترون معين غير وارد. أما بالنسبة لعدد كبير من الإلكترونات فإنه يمكن تحديد المدى تجريبيا. ولهذا الغرض، يجب قياس عدد الجسيمات N كدالة من سمك المادة الممتصة x. ولتنفيذ ذلك يتم تثبيت كل من مصدر جسيمات بيتا والكاشف على مسافة مناسبة، وتوضع بينهما ألواح من المادة المعنية ذات كثافة مختلفة. ويتم قياس معدل العد عند كل سمك .




شكل (3−6)

أ − منحنى امتصاص لمصدر بيتا نقي.

ب− منحنى الامتصاص لمصدر بيتا مركب

ج− منحنى الامتصاص لمصدر بيتا يصدر في الوقت نفسه إشعاعات جاما

ويتم قياس معدل العد عند كل سمك. ويزاد السمك حتى يصبح معدل العد مساويا للصفر ثم ترسم العلاقة بين كل من N ، x على ورق نصف لوغاريتمي . ويعرف المنحنى الناتج بمنحنى الامتصاص. ويبين شكل (3−6) ثلاثة منحنيات امتصاص لثلاثة مصادر بيتا مختلفة. الأول أ يمثل منحنى الامتصاص لمصدر بيتا نقي يصدر طيفا واحدا من جسيمات بيتا. والثاني ب يمثل منحنى الامتصاص لمصدر بيتا مركب أي يصدر عدة أطياف من جسيمات بيتا. وأما الثالث ج فهو يمثل منحنى الامتصاص لمصدر بيتا يصدر في الوقت نفسه إشعاعات جاما. ويبين الشكل (3−6أ) مدى الاختلاف بين المنحنى الواقعي للامتصاص وبين

العلاقة (3−13) التي تمثل في هذا المقياس خطا مستقيما. وعموما، يعتمد شكل منحنى الامتصاص المحدد تجريبيا على الوضع الهندسي للكاشف وعلى نوع مصدر بيتا. ولكن هذه العوامل لا تؤثر كثيرا على المدى الذي يمكن تحديده تجريبيا من نقطة تلاقي المنحنى بالمحور x، أي عندما يصبح عدد الجسيمات مساويا للصفر. وعموما، يصعب تحديد هذه النقطة لسببين:

السبب الأول وجود خلفية إشعاعية (background radiation) من جسيمات بيتا مصدرها الأشعة الكونية أو أي مصادر بيتا أخرى بعيدة. والسبب الثاني وجود نسبة من إشعاعات جاما صادرة من المصدر نفسه ( المنحنى ج ) أو في شكل خلفية إشعاعية. وتضيف الخلفية الإشعاعية ذيلا إلى منحى الامتصاص كالمبين في شكل (3−6ج) . لذا، فإنه يجب أن تطرح قيمة الخلفية الإشعاعية من جميع القراءات حتى يسهل إيجاد نقطة النهاية للمنحنى.

## 3−4 التفاعل المتبادل بين إشعاعات جاما والمادة
## Interaction of gamma radiation with matter

### 3−4−1 انتقال الطاقة من إشعاعات جاما إلى المادة

تختلف أساليب انتقال الطاقة من إشعاعات جاما إلى المادة اختلافا جوهريا عن تلك الأساليب التي تنتقل بها الجسيمات المشحونة إلى المادة. فعندما يسقط فوتون جاما على المادة فإنه يمكن أن يفقد طاقته ويمنحها للمادة عن طريق إحدى العمليات الثلاث الرئيسة التالية:

أ− **التأثير الكهروضوئي (The photoelectric effect)**: وخلاله يفقد فوتون جاما طاقته بالكامل ويمنحها لأحد الإلكترونات شديدة الإرتباط بنواة ذرة من ذرات المادة، أي لأحد إلكترونات القشرات (المدارات) الداخلية للذرة، وبالتالي يفني هذا الفوتون.

**ب− تأثير كومبتون (Compton effect)** : وخلاله يفقد فوتون جاما جزءا من طاقته ويمنحها لأحد الإلكترونات الحرة أو ضعيفة الارتباط

بالذرة ( أي أحد إلكترونات المدارات الخارجية للذرة)، وبالتالي ينحرف هذا الفوتون عن مساره.

ج- **إنتاج الأزواج (The pair production)** : ويمكن أن يحدث عندما يقترب الفوتون اقترابا كبيرا من نــواة الــذرة ويتفاعــل مــع المجــال الكهربائي الشديد لها. وخلال هذا التفاعل يفقد فوتون جاما طاقته بالكامل منتجا زوجا إلكترونيا – بوزيترونيا، وبالتالي يفنى هــذا الفوتــون. ولا يمكن أن يحدث هذا النوع من التفاعل مع المجال الكهربائي لنواة الــذرة إلا إذا كانت طاقة الفوتون أعلى من 1.022 إلكترون فولت، وهي الطاقة اللازمة لإنتاج كتلتي السكون لكل من الإلكترون والبوزترون.

وينبغي التأكيد على أن العمليتين الأولى والثانية يمكن أن تحــدثان عند جميع طاقات الإشعاعات الكهرومغناطيسية بما فــي ذلــك الأشــعة السينية (x-ray) وإشعاعات الانكباح. أما العملية الثالثــة فــلا يمكــن أن تحدث إلا إذا تجاوزت طاقة الأشعة الكهرومغناطيسية الطاقــة المحــددة أعلاه. وبالإضافة إلى ذلك، هناك عدة عمليات نووية أخرى للتفاعل بين إشعاعات جاما والأشعة السينية سوف ترد في نهاية هذا الجزء، وذلــك بسبب عدم أهميتها من وجهة نظر امتصاص أشعة جاما والأشعة السينية في المادة.

## 3-4-2 توهين إشعاعات جاما في المادة

**Attenuation of gamma radiation in matter**

عند سقوط حزمة متوازية من إشعاعات جاما أو الأشعة الســينية على المادة الممتصة يخرج الفوتون الذي يتفاعل مع أحد ذرات المادة – بأي من العمليات الثلاث – من الحزمة وذلك بسبب امتصــاص طاقتــه بالكامل وفنائه ( خلال عمليتي التأثير الكهروضوئي أو إنتاج الأزواج ) أو بسبب تشتته أو انحرافه عن مساره (تأثير كومبتون). بــذلك، يكــون عدد الفوتونات dN التي تخرج من الحزمة متناسبا طرديــا مــع عــدد الفوتونات الساقطة $N_0$ ومع سمك المادة الموهنة (الممتصة) dx ، أي أن:

$$dN = - \mu N_0 dx \qquad (3\text{-}17)$$

حيث: $\mu$ هو ثابت التناسب ويعرف باسم معامل التوهين الخطي (linear attenuation coefficient) وهو يختلف قليلا عن معامل الامتصاص الخطي (linear absorption coefficient). أما الإشارة السالبة فتعني تناقص عدد الفوتونات التي تخترق المادة كلما زادت مسافة التغلغل في المادة (أي زيادة عدد الفوتونات الخارجة من الحزمة كلما زاد سمك المادة الممتصة). وعموما، جرى العرف على استخدام شدة الإشعاعات I بدلا من عدد الفوتونات N . لذلك، يفضل كتابة المعادلة (3–17) في الشكل التالي:

$$dI = -\mu I_0 \, dx \qquad (3\text{-}18)$$

وعند تكامل طرفي المعادلة (3–18) نحصل على العلاقة المعروفة التالية:

$$I = I_0 \, e^{-\mu\mu x} \qquad (3\text{-}19)$$

حيث: $I_0$ هي شدة الإشعاعات الساقطة على المادة، I هي شدة الإشعاعات التي اخترقت سمكا من المادة مقداره x ولا تشمل أية إشعاعات ثانوية قد تنتج بسبب التفاعل داخل هذا السمك.

وكما سيتضح فيما بعد يعتمد معامل التوهين الخطي $\mu\mu$ على طاقة إشعاعات جاما وعلى نوع المادة. لذلك، فإنه عندما تحتوي حزمة إشعاعات جاما على خليط من طاقات مختلفة فإنه يمكن حساب شدة الإشعاعات المخترقة لكل طاقة على حدة باستخدام العلاقة (3–19). وبذلك، تصبح الشدة الكلية بعد الاختراق هي:

$$I_t = \sum_i I_{oi} \, e^{-\mu_i(E)\, x} \qquad (3\text{-}20)$$

ويرتبط معامل التوهين الخطي $\mu$ بعدد الذرات n الموجودة في اسم$^3$ من المادة الممتصة وبالمقطع العرضي الكلي $\sigma$ (E) لتفاعل الفوتونات مع المادة. فمعدل التوهين بالنسبة للتغلغل ( أي التوهين في اسم من المادة ) يتناسب مع شدة الفوتونات الساقطة $I_0$ ومع كل من عدد الذرات في وحدة الحجم ( 1سم$^3$ ) n ، والمقطع العرضي الكلي $\sigma$، أي أن:

$$- dI / dx = n \sigma (E) I_0 \qquad (3\text{-}21)$$

وبمقارنة هذه العلاقة الأخيرة بالعلاقة (3−18) يتضح أن:

$$\mu(E) = n \sigma (E) \qquad (3\text{-}22)$$

أي أن معامل التوهين الخطي $\mu$ هو عبارة عن حاصل ضرب عدد الذرات في اسم$^3$ من المادة في المقطع العرضي الكلي $\sigma$ (E) عند الطاقة المعينة E .

وقد سبق تعريف المقطع العرضي $\sigma$ (E) لتفاعل ما بأنه احتمال حدوث هذا التفاعل إذا سقط جسيم واحد على ذرة واحدة موجودة في مقطع مساحته 1 سم$^2$. ولما كانت إشعاعات جاما تتفاعل مع المادة عن طريق العمليات الثلاث المذكورة فإن تعريف المقطع العرضي الكلي لها هو عبارة عن مجموع المقاطع العرضية لكل نوع على حدة، أي أن:

$$\sigma (E) = \sigma_{ph} (E) + \sigma_c (E) + \sigma_p (E) \qquad (3\text{-}23)$$

حيث: $\sigma_{ph}(E)$، $\sigma_c$ (E) ، $\sigma_p$ (E) هي المقاطع العرضية للتأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتون وإنتاج الأزواج بالترتيب. لذا، فإنه يمكن كتابة معامل التوهين الخطي $\mu$ كالتالي:

$$\mu (E) = n \{ \sigma_{ph} (E) + \sigma_c (E) + \sigma_p (E) \}$$

أي أن:

$$\mu(E) = \mu_{ph} + \mu_c + \mu_p \qquad (3\text{-}24)$$

أي أن معامل التوهين الخطي $\mu$ لمادة معينة عند طاقة معينة E هو عبارة عن مجموع معاملات التوهين الجزئية لكل من التأثير الكهروضوئي $\mu_{ph}$ ، وتأثير كومبتون $\mu_c$ ، وإنتاج الأزواج $\mu_p$ عند هذه الطاقة.

وكثيرا ما تستخدم معاملات توهين أخرى تعرف باسم معامل التوهين الكتلي (The mass absorption coefficient) أو معامل التوهين الذري (The atomic absorption coefficient). وترتبط هذه المعاملات الأخيرة بمعامل التوهين الخطي بالعلاقات التالية:

$$\mu_{mass} = \mu / \rho \quad (cm^2 / gm) \qquad (3\text{-}25)$$

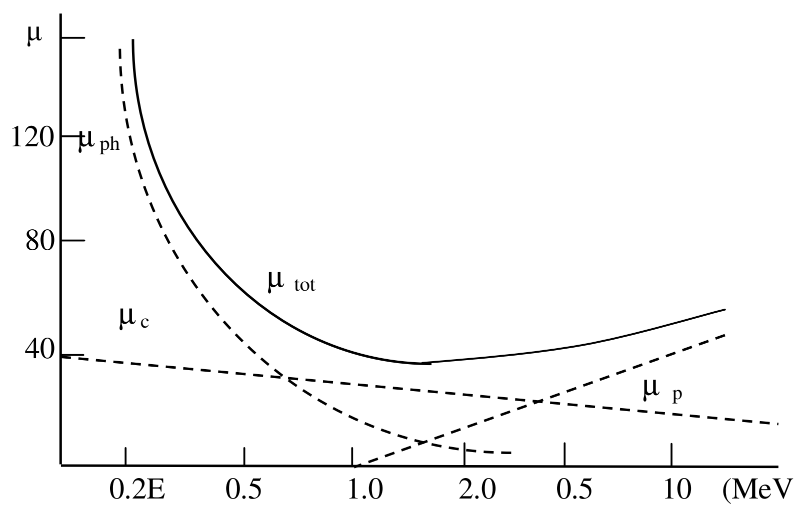
$$\mu_{atom} = (\mu / \rho) .(A/N_a) \qquad (3\text{-}26)$$

حيث $\rho$ هي كثافة المادة الماصة، A عددها الكتلي، $N_a$ هو عـــدد أفوجادرو ($6.02x10^{23}$ ذرة لكل جرام ذري ).

وتعتمد معاملات التوهين الجزئية للتأثير الكهروضـــوئي $\mu_{ph}$، ولتـــأثير كمبتون $\mu_c$، ولإنتاج الأزواج $\mu_p$ اعتمادا كبيرا على طاقـــة إشـــعاعات جاما. وبصفة عامة، فإنه عندما تكون طاقة إشعاعات جاما أقل من 0.2 ميغا إلكترون فولت يكون $\mu_{ph}$ عاليا جدا في حـــين يكـــون $\mu_p$ مســـاويا للصفر. أي أن التأثير الكهروضوئي يشكل عندئذ الوسيلة الرئيسة لتوهين الفوتونات ذات الطاقة المنخفضة حيث يكون معامل التـــوهين الخطـــي لتأثير كمبتون $\mu_c$ أقل من معامل التوهين للتـــأثير الكهروضـــوئي $\mu_{ph}$. وبزيادة طاقة إشعاعات جاما ينخفض $\mu_{ph}$ انخفاضا سريعا في حين يكون انخفاض $\mu_c$ بزيادة الطاقة بطيئا. لذلك، يصبح تأثير كومبتون ذا أهميـــة أكبر عند الطاقات في حدود 1 ميغا إلكترون فولت. أما إنتاج الأوزاج فلا يحدث إطلاقا إذا كانت طاقة إشعاعات جامـــا أقـــل مـــن 10.22 ميغـــا إلكترون فولت ( حيث أن الطاقة التي يلزم تحولها إلـــى كتلـــة لتكـــوين الزوح الإلكتروني البوزيتروني هي 10.22 ميغا إلكترون فولت ). ولكن بزيادة طاقة إشعاعات جاما فإنه سرعان ما تصبح عملية إنتاج الأزواج أهم عملية بين العمليات الثلاثة. ويوضح شكل (3–7) كيفية تغير كل من $\mu_{ph}$ ، $\mu_c$ ، $\mu_p$ كدالة من الطاقة بالنسبة لعنصر الرصاص. كمـــا يبـــين أهمية كل من العمليات الثلاث عند الطاقة المعينـــة. ويمثـــل المنحنـــى المستمر في هذا الشكل معامل التوهين الكلي لعنصر الرصاص كدالة من الطاقة. وجدير بالذكر أن استخدام معامل التوهين الكلي لحساب ســـمك الحواجز الواقية من إشعاعات جاما ليس دقيقا. ويعود ذلك أولا لاختلاف هذا المعامل باختلاف الطاقة. والسبب الآخر والأهم هو تكون إشعاعات ثانوية داخل المادة ذاتها ( نتيجة تأثير كومبتون وإنتاج الأزواج ). وقـــد يكون السمك المحسوب أقل من السمك اللازم لتوهين تلك الإشـــعاعات خاصة وأنها تتكون على أعماق مختلفة من الحـــاجز. كـــذلك، تجـــدر الإشارة إلى أن التأين النوعي الناتج عن إشعاعات جاما أقل بكثير مـــن

ذلك الناتج عن الجسيمات المشحونة. وهذا التـأين نـاتج أساسـا عـن الإلكترونات الثانوية التي انطلقت بعد أن منحتها إشعاعات جاما كـل طاقتها أو جزءا منها. لذلك، نجد أن قدرة إشعاعات جاما على الاختراق كبيرة للغاية بالمقارنة بقدرة الإلكترونات، وبالتـالي بالمقارنـة بقـدرة الجسيمات المشحونة الثقيلة.

وفي بعض الأحيان يستخدم اصطلاح السمك النصفي من المـادة $x_{1/2}$ (half-thickness) أو HVL (half-value layer) وهو عبارة عن سمك المادة المعينة اللازم لخفض شدة الإشعاعات إلى النصف، أي أن:




شكل (3−7)

تغير كل من $\mu_{ph}$، $\mu_c$، $\mu_p$، $\mu_{tot}$ ، كدالة من الطاقة لعنصر الرصاص

$$I_x / I_0 = \tfrac{1}{2} = e^{-\mu x 1/2}$$

وبالتالي فإن السمك النصفي هو:

$$x_{1/2} = \ln 2 / \mu = .693 / \mu \quad (cm) \qquad (3\text{-}27)$$

## 3−4−3 التأثير الكهروضوئي The photoelectric effect

ذكرنا أن التأثير الكهروضوئي هو أحد عمليات تفاعل إشعاعات جاما مع المادة. فنتيجة للتصادم المباشر بين الفوتـــون الســـاقط وأحـــد الإلكترونات المرتبطة بالذرة تنتقل طاقة الفوتـــون بأكملهـــا إلـــى ذلـــك الإلكترون الذي ينطلق تاركا ذرته. ويسمى هـــذا الإلكتـــرون المنطلـــق بالإلكترون الكهروضوئي (the photoelectric electron) . ويمكن التعبيـــر عن طاقة الإلكترون المنطلق طبقا لقانون بقاء الطاقة بالعلاقة التالية:

$$E_e = E_\gamma - B = h\nu - B$$

حيث $E_e$ هي طاقة الإلكترون المنطلق ، $E_\gamma$ طاقة الفوتون الساقط وهي تساوي $h\nu$ ،حيث: $h$ ثابت بلانك، $\nu$ تردد الإشعاع . أما $B$ فهـــي عبارة عن طاقة ترابط الإلكترون بالذرة. لذا لا يحدث هذا الأثـــر إلا إذا كانت طاقة الفوتون أكـــبر من طاقـــة ترابط الإلكترون بالذرة، أي أن: $h\nu > B$ . فالفوتونات التي تكون طاقتها أكبر بقليل مـــن طاقـــة تـــرابط الإلكترون بالذرة تحدث الأثر الكهروضوئي مع إلكترونـــات المـــدارات الخارجية للذرة نظرا لترابطها الضعيف بنواة الـــذرة. وبزيـــادة طاقـــة الفوتونات فإنها تحدث الأثر الكهروضوئي على الإلكترونـــات الأكثـــر ترابطا بنواة الذرة إلى أن تصبح طاقة الفوتون أكبر من ترابط الإلكترون في المدار K ( أي $h\nu > B_K$ )، عندئذ يمكن أن تشترك جميع إلكترونات الذرة في التأثير الكهروضوئي ويجب ملاحظة أنه لا يمكـــن حـــدوث التأثير الكهروضوئي على الإلكترونات الحرة، نظرا لعدم تحقق قـــانون بقاء الزخم ( في حالة الإلكترون المترابط بالذرة يتحقق قانون بقاء الزخم حيث تحمل الذرة عند انطلاق الإلكترون الجزء الباقي من الزخم). وعند خروج إلكترون من المدار K يحل محله إلكترون آخر مـــن المـــدار L وبالتالي تنطلق من الذرة إشعاعات سينية مميزة لها، التي هي عبارة عن فرق طاقتي الترابط في المدارين K ، L ، أي أن:

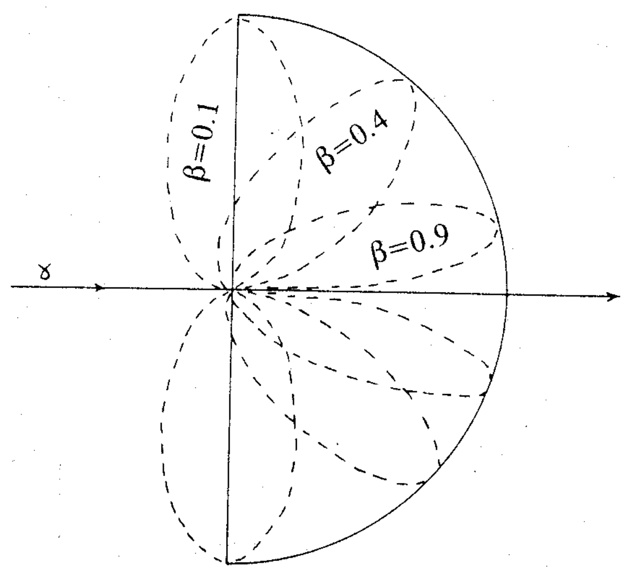
$$h\nu_1 = B_K - B_L$$

وحتى الآن يصعب إيجاد علاقة نظرية لتعيـــين قيمـــة المقطـــع العرضي للتأثير الكهروضوئي $\sigma_{ph}$. لذا، يتم تعين قيم هذا المقاطع عمليا من منحنيات كالمبينة في شكل(3−7). ومع ذلك توجد علاقة شبه نظرية لتحديد قيم المقطع العرضي للتأثير الكهروضوئي فـــي حالـــة انطـــلاق الإلكترون من المدار K وهذه العلاقة هي:

$$\sigma_{ph}(k) = 1.068 \times 10^{-32} Z^5 [(m_0 c^2 / h\nu)]^{7/2} \quad cm^2 \qquad (3\text{-}29)$$

حيث: Z هو العدد الذري للمادة الممتصة، c سرعة الضوء في الفراغ، $m_0$ كتلة السكون للإلكترون، ν هو تردد الفوتون الساقط. ولا تصلح هذه العلاقة الأخيرة للاستخدام عند زيادة طاقة الفوتونات. فعندما تصبح طاقة الفوتون $m_0 c^2 << h\nu\nu$ تتخذ العلاقة (3−29) الشكل التالي:

$$\sigma_{ph}(k) \approx 1.068 \times 10^{-32} Z^5 (m_0 c^2 / h\nu) \quad cm^2 \qquad (3\text{-}30)$$




**شكل (٣ ـ ٨)**

اتجاهات انطلاق الإلكترون الكهروضوئي عند قيم مختلفة للمعامل β

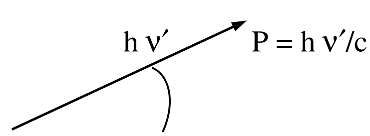
ويلاحظ من العلاقة (3–29) السابقة أن المقطع العرضي للتأثير الكهروضوئي يتناسب طرديا مع $Z^5$ للمادة الممتصة. لذلك ،تفضل العناصر ذات العدد الذري الكبير كالرصاص واليورانيوم لعمل الدروع والحواجز الواقية من إشعاعات جاما خاصة عند الطاقات المنخفضة لهذه الإشعاعات.

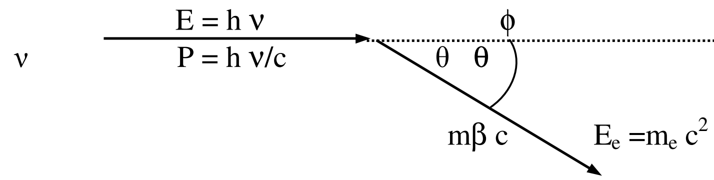
وعندما تكون طاقة الفوتونات صغيرة يكون احتمال انطلاق الإلكترون الكهروضوئي أكبر ما يكون في اتجاه عمودي على اتجاه السقوط. وبزيادة طاقة الفوتون يزداد احتمال انطلاق الإلكترون مكونا زاوية أقل من $90^\circ$ درجة بالنسبة لاتجاه السقوط. وعند الطاقات العالية جدا يصبح انطلاق الإلكترونات أكبر ما يكون في اتجاه قريب من اتجاه السقوط. ولكن لا ينطلق الإلكترون الكهروضوئي إطلاقا في اتجاه سقوط الفوتون بسبب قانون بقاء الزخم. ويبين شكل (3–8) اتجاهات انطلاق الإلكترون الكهروضوئي عند قيم مختلفة للمعامل $\beta = v / c$ ، حيث $v$ سرعة الإلكترون عند الانطلاق ، $c$ سرعة الضوء في الفراغ.

## 3–4–4 تأثير كومبتون Compton effect

بينما لا يحدث التأثير الكهروضوئي إلا على الإلكترونات المرتبطة بالذرة ارتباطا شديدا، فإنه يمكن أن يحدث تأثير كومبتون على الإلكترونات الحرة أو الإلكترونات ضعيفة الارتباط بالذرة. ويتلخص هذا التأثير في أنه عند سقوط فوتون طاقته $h\text{-}\nu$ على إلكترون حر يكتسب الإلكترون جزءا من هذه الطاقة فينطلق بسرعة معينة بينما يفقد الفوتون هذه الطاقة وتصبح طاقته $h\nu'$ ، ويتشتت (يحيد) بالتالي عن مساره. ويوضح شكل (3–9) هذه العملية حيث تظهر قيمة طاقة وزخم كل جسيم قبل وبعد التشتت. وترمز $m$ لكتلة الإلكترون بعد تشتته. وهذه الكتلة مرتبطة بكتلته عند السكون بالعلاقة المعروفة:

$$m = m_0 / (1 - \beta)^{1/2}$$






شكل (3−9)
طاقة ووزخم الفوتون والإلكترون قبل وبعد تشتت كومبتون

وحيث أنه لا يشترك في التصادم إلا الفوتون والإلكتــرون فإنــه يمكن كتابة معادلات بقاء الطاقة والزخم ( كمية الحركة ) في الاتجاهين الأفقي والرأسي بالتتابع بالمعادلات (3−32) الثلاثة التالية:

$$h\nu = h\nu'\acute{\upsilon} + mc^2 - m_0 c^2$$

$$h\nu = (h\nu'/c)\cos\phi + m\beta c \cos\theta\theta \qquad (3\text{-}32)$$

$$0 = (h\nu'/c)\sin\phi - m\beta c \sin\phi\,\theta$$

وبحل هذه المجموعة من المعادلات يمكن إيجــاد قيمــة طاقــة الفوتون المتشتت والعلاقة بين زاوية تشتت الفوتون وزاويــة انطــلاق الإلكترون على النحو التالي:

$$h\nu' = h\nu / [\,1 + \gamma\,(1-\cos\phi)\,] \qquad (3\text{-}33)$$

حيث:

$$\gamma = h\nu / m_0 c^2$$

$$\cos\theta = -(1+\gamma)\tan(\phi/2) \qquad (3\text{-}34)$$

وتجدر الإشارة إلى أن الفوتون يمكن أن يتشتت بزوايا مختلفــة وتعتمد طاقته $h\nu'$ بعد التشتت على زاوية تشتته $\phi$ فكلما زادت زاوية تشتته قلت طاقته وهو ما توضحه العلاقة (3−33).

وقد تمكن كل من كلين ونيشينا (Klien and Nishina) من حساب المقطع العرضي لتشتت كومبتون $\sigma_c$ نظريا، وحددا هذا المقطع بالعلاقة التالية:

$$\sigma_c = (\pi e^4/m_0^2 c^4)(1/\gamma)\{[1-2(\gamma+1)/\gamma^2]\ln(2\gamma+1)+1/2+4/\gamma-1/2(2\gamma+1)^2\} \quad (3\text{-}35)$$

وهكذا يتضح أن المقطع العرضي لأثر كومبتون $\sigma_c$ يقل بالتدريج عند زيادة طاقة الفوتون الساقط،

ويمكن الحصول على معامل التوهين الخطي لأثر كومبتون $\mu_c$ وذلك بمعرفة كل من المقطع العرضي لتأثير كمبتون $\sigma_c$ وعدد الإلكترونات N في كل 1 سم$^3$ من المادة الماصة وهو يساوي $N = n Z$ : أي أن

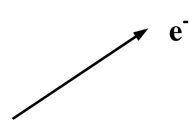
$$\mu_c = n Z \sigma_c \quad (3\text{-}36)$$

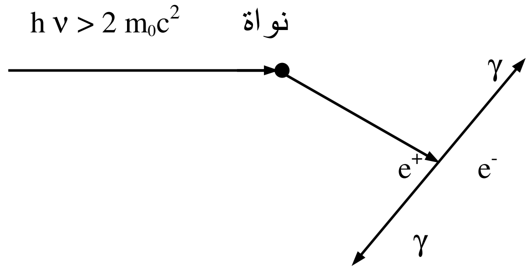
حيث n هي عدد الذرات في 1 سم$^3$ و Z هو العدد الذري للمادة المعينة.

### 3-4-5 إنتاج الأزواج The pair production

من المعروف أن طاقة السكون للإلكترون هي $m_0c^2 = 0.511$ ميغا إلكترون فولت. وعندما تكون طاقة الفوتون الساقط أكبر من ضعف هذه القيمة ( أي أكبر من 1.022 إلكترون فولت )، فإنه يحدث تفاعل بين الفوتون الساقط والمجال الكهربي للنواة ينتج عنه فناء الفوتون وتولد ( أو إنتاج) إلكترون سالب وبوزيترون موجب ينطلقان بطاقتي حركة للإلكترون والبوزترون $T_+, T_-$ على الترتيب. ويبين الشكل (3-10) رسما توضيحيا لهذه العملية. وباستخدام قانون بقاء الطاقة يسهل إيجاد طاقتي الحركة لكل من الإلكترون والبوزيترون، حيث أن:

$$h\nu - 2 m_0 c^2 = T_- + T_+ \quad (3\text{-}37)$$






شكل (3−10)
رسم توضيحي لعملية إنتاج الزوج
الإلكتروني البوزتروني ثم فناء البوزترون

فعلى سبيل المثال، إذا كانت طاقة الفوتون الساقط 10 ميغا إلكترون فولت فإنه يستغل من هذه الطاقة ما مقداره 1.022 ميغا إلكترون فولت في إنتاج كتلتي الإلكترون والبوزيترون، وتوزع القيمة الباقية من الطاقة، وهي 10 − 1.022 = 8.978 ميغا إلكترون فولت في شكل طاقة حركية لكل من الإلكترون والبوزيترون. ومن حيث المبدأ، يمكن أن تتوزع الطاقة الباقية بين الإلكترون والبوزيترون بنسب مختلفة. ولكن وجد إحصائيا أن طاقة البوزيترون تكون أكبر بقليل من طاقة الإلكترون لأن البوزيترون يتنافر مع النواة في حين يتجاذب الإلكترون معها.

وقد وجد أنه يمكن حساب المقطع العرضي $\sigma\sigma_p$ لإنتاج الأزواج بطريقة عددية لبعض المواد بالمعادلة التالية:

$$\sigma_p = 5.93 \quad Z^2 \times 10^{-28} \quad \text{(barn)} \qquad (3\text{-}38)$$

وأما بالنسبة لباقي المواد فإنه يمكن استخدام العلاقة نفسها أو استخدام الجداول أو القيم التجريبية من المنحنيات كالموضح في شكل(3−7). ويتضح من العلاقة (3−38) أن المقطع العرضي لإنتاج الأزواج $\sigma_p$ يتناسب مع مربع العدد الذري، أي مع $Z^2$ للمادة الماصة. وهذا ما يؤكد أفضلية العناصر الثقيلة عند عمل الحواجز الواقية من

إشعاعات جاما عند الطاقات العالية لهذه الإشعاعات. ويمكن تحديد معامل التوهين الخطي لإنتاج الأزواج بدلالة عدد الذرات (النوى) n في ا سم$^3$ والمقطع العرضي لإنتاج الأزواج $\sigma_p$ من العلاقة:

$$\mu_p = n\,\sigma_p \quad (cm^{-1}) \qquad (3\text{-}39)$$

## 3-6-4 التشتت النووي التجاوبي وأثر موسباور

**The nuclear resonance scattering and the Mossbauer effect**

بالإضافة إلى الأساليب الرئيسة السابقة يمكن أن تحدث عدة أنواع أخرى من التفاعلات المتبادلة بين إشعاعات جاما وبين المادة، تفقد عن طريقها هذه الإشعاعات طاقتها. ومن أمثلة هذه التفاعلات ما يعرف باسم التفاعل النووي بالفوتونات (photonuclear reaction) حيث تمتص النواة الفوتون الساقط وينتج عن هذا الامتصاص خروج جسيم من النواة كالنيوترون أو البروتون أو غيرهما. كذلك، يعتبر التشتت النووي التجاوبي للفوتونات أحد أنواع تفاعلات الفوتونات الساقطة مع المادة. وتعتبر جميع هذه التفاعلات مهملة من وجهة نظر امتصاص المادة للفوتونات وذلك لصغر مقاطعها العرضية بالمقارنة بكل من التأثير الكهروضوئي أو تشتت كوميتون أو إنتاج الأزواج.

ومع ذلك يعتبر التشتت النووي التجاوبي (nuclear resonance scattering) ذا أهمية خاصة لارتباطه بالظاهرة المعروفة باسم تأثير موسباور. ويتلخص التشتت النووي التجاوبي في أنه إذا كانت طاقة الفوتون الساقط تماثل طاقة الإثارة لأحد مستويات (حالات النواة الطاقية) يمكن أن تمتص النواة هذا الفوتون وتنتقل بذلك من الحالة الأرضية إلى الحالة المثارة ذات الطاقة المحددة. ويقال في هذه الحالة إنه حدث للفوتون امتصاص تجاوبي في النواة (resonance absorption). فإذا انبعث الفوتون من جديد من النواة المثارة ( حتى تعود إلى الحالة الأرضية) كانت طاقته أقل بمقدار ضئيل للغاية من طاقة الفوتون الممتص، حيث تحمل النواة المرتدة هذه الطاقة الصغيرة للغاية والمعروفة باسم طاقة الارتداد. لذلك، فإن هذا الفوتون المنبعث من جديد من النواة لا يمكن أن يعاد امتصاصه بواسطة نواة من النوع نفسه لأن طاقته أصبحت أقل من

طاقة الامتصاص التجاوبي. ولما كانت طاقة الارتداد صغيرة للغاية فإنه يمكن أن يعاد امتصاص الفوتون المنبعث إذا أ ضيف للنواة المماثلة طاقة تساوي تماما طاقة الارتداد. وتعرف هذه الظاهرة باسم تأثير موسباور. ويعتبر تأثير موسباور فائق الحساسية لأي تغيرات طفيفة في طاقة الفوتون المنبعث نظرا لصغر طاقة الارتداد. وبسبب حساسيته الفائقة يستخدم تأثير موسباور في إجراء القياسات التي تتطلب حساسيةعالية.

## 3-5 التفاعل المتبادل بين النيوترونات والمادة

**Interaction of neutrons with matter**

سبق أن تعرفنا على النيوترون وهو عبارة عن جسيم متعادل الشحنة كتلته 1.0866 و ك ذ (939.52 ميغا إلكترون فولت). وتصنف النيوترونات تبعا لطاقتها الحركية إلى الأنواع التالية:

**نيوترونات حرارية ونيوترونات بطيئة:** النيوترونات الحرارية هي النيوترونات التي تقل طاقتها الحركية عن حوالي 1 إلكترون فولت في حين أن النيوترونات البطيئة هي التي تتراوح طاقتها بين 1 إلكترون فولط، 0.1 كيلو إلكترون فولت.

**نيوترونات بينية الطاقة:** هي النيوترونات التي تتراوح طاقتها بين 0.1 ، 20 كيلو إلكترون فولت.

**نيوترونات سريعة:** هي النيوترونات التي تتراوح طاقتها بين 0.2 − 10 ميغا إلكترون فولت.

**نيوترونات عالية الطاقة:** هي النيوترونات التي تزيد طاقتها على 10 ميغا إلكترون فولت.

ونظرا لعدم وجود شحنة للنيوترون فإنه يتميز بخصائص تختلف كثيرا عن خصائص الجسيمات المشحونة. ومن هذه الخصائص أنه لا يمكن تعجيله ( تسريعه ) ولا يمكن أن يؤين النيوترون ذرات المادة ولا يحدث عنه أية تفاعلات كهروستاتيكية مع النواة أو الإلكترونات. لذا، فإنه إن لم يتفاعل النيوترون تفاعلا نوويا مع نوى الذرات تكون المادة بالنسبة لهذا النيوترون كالفراغ، مما يجعل له قدرة كبيرة على اختراق

المادة. ويتفكك النيوترون تلقائيا بعد خروجه من النـــواة إلـــى بروتـــون وجسيم بيتا ونيوترينو مضاد وفقا لتفاعل التفكك:

$$^{o}n \longrightarrow P^{+} + \beta^{-} + \acute{\upsilon}$$

ويبلغ عمره النصفي 15 دقيقة.

## 1-5-3 مصادر النيوترونات The neutron sources

لا توجد في الطبيعة نظائر طبيعية مشعة للنيوترونـــات. ولكـــن أمكن في السنوات الأخيرة إنتاج نظير الكاليفورينوم 252($^{252}_{98}Cf$) الذي يعتبر حتى الآن النظير الصناعي الوحيد للنيوترونات بعمر نصف يبلـــغ 2.65 سنة. وقد استخدمت التفاعلات النووية المختلفة، خاصـــة تفاعـــل جسيم ألفا نيوترون ($\alpha$,n) على العناصر الخفيفة كمصدر للنيوترونات منذ الثلاثينيات. وحتى الآن تعتبر هذه التفاعلات مع تفـــاعلات الانشـــطار والاندماج النووي هي المصادر الوحيدة للنيوترونات، ولنستعرض بعض هذه المصادر.

### أ- مصدر الكاليفورنيوم Californium 252 Sources

يتم إنتاج الكاليفورنيوم 252 في الوقت الحالي فـــي المفـــاعلات النووية. ويتفكك نظير الكاليفورنيوم 252 تلقائيا مصدرا جسيم ألفا أحيانا وقد يتفكك مصدرا نيوترونا طبقا للمعادلة:

$$^{252}_{98}Cf \longrightarrow {}^{251}_{98}Cf + {}^{1}_{0}n$$

ويبلغ معدل الانبعاث النيوتروني $2.3 \times 10^{6}$ نيوترونا في الثانية لكل 1 ميكروجرام من الكاليفورنيوم 252 . وتنطلق النيوترونـــات مـــن الكاليفورنيوم 252 بطاقات تتراوح بين 1 – 6 ميغا إلكترون فولت.

### ب- مصدر الراديوم – بريليوم Radium-beryllium source

يعتبر هذا المصدر من أرخص مصـــادر النيوترونـــات. وتنـــتج النيوترونات في هذا المصدر عند قذف نواة البريليـــوم 9 بجســـيم ألفـــا فينطلق نيوترون طبقا للتفاعل التالي:

$$\alpha + {}^{9}_{4}Be \longrightarrow {}^{12}_{6}C + n + 5.76\ MeV$$

ويستخدم نظير الراديوم 226 ($^{226}Ra$) كمصدر لجسيمات ألفا وأحيانا يستخدم البولينيوم أو الرادون بدلا منه. ويحضر المصدر بخلط كمية من الراديوم مع كمية أخرى من مسحوق البريليوم. فعند خلط جرام واحد من الراديوم مع عدة جرامات من مسحوق البريليوم يمكن الحصول على مصدر نيوتروني يبلغ مردوده (Neutron yield) أي عدد النيوترونات المنبعثة منه في الثانية الواحدة حوالي $10^{6}$ نيوترون سريع في الثانية. ويجب وضع الخليط داخل كبسولة محكمة الإغلاق وغير قابلة للكسر حتى لا يحدث تلوث بمصادر جسيمات ألفا.

ومن المعروف أن الراديوم 226 يصدر جسيمات ألفا بطاقات محددة تقع بين 4.79 ، 7.68 ميغا إلكترون فولت. ونظرا لفقدان جسيمات ألفا لطاقتها أثناء مرورها في مسحوق البريليوم، لذا تتراوح طاقات النيوترونات الصادرة عن هذا المصدر بين 1،12ميغا إلكترون فولت. ولما كان العمر النصفي للراديوم 1600 سنة، لذلك، تظل شدة المصدر ثابتة لعدة مئات من السنين. ولهذا السبب، وكذلك للمشاكل المترتبة على مصدر الراديوم الذي يتفكك إلى غاز الرادون مما قد يودي إلى انفجار الكبسولة الحاوية وتسرب الراديوم المشع فقد توقف إنتاج هذه المصادر حاليا.

### ج- مصدر البولونيوم بريليوم أو الأميريشيوم بريليوم

يستخدم في الوقت الحالي نظير البولونيوم 210 الذي يبلغ عمره النصفي 138 يوما ويعتبر مصدرا لجسيمات ألفا بدلا من الراديوم 226 لتحضير مصادر النيوترونات مع البريليوم. إلا أنه نظرا للعمر النصفي القصير نسبيا لنظير البولونيوم 210 فقد حل مصدر الأميريشيوم 241 محل الراديوم 226 والبولونيوم 210. وباتت الان مصادر الأميريشيوم241 بريليوم هي المصادر المتداولة في معظم التطبيقات الصناعية.

### د- مصدر النيوترونات الفوتوني The photoneutron source

يتلخص مبدأ عمل هذا1 المصدر على قذف بعض النوى بالفوتونات فينتج عن ذلك انبعاث النيوترونات. ويقوم عمل معظم المصادر من هذا النوع على استخدام التفاعلين التاليين.

$$\gamma + {}^{9}_{4}Be \longrightarrow 2\alpha + n - 1.67\ MeV$$

$$\gamma + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{1}_{1}H + n - 2.23\ MeV$$

وتتميز التفاعلات الناتجة عن قذف النوى بإشعاعات جاما بأنها عتبية ( أي لا تتم إلا إذا زادت طاقة إشعاعات جاما الساقطة عن حد معين). فبالنسبة للتفاعل الأول يجب ألا تقل طاقة إشعاعات جاما عن 1.67 ميغا إلكترون فولت. أما بالنسبة للتفاعل الثاني فيجب ألا تقل طاقة الإشعاعات عن 2.23 ميغا إلكترون فولت.

وتتميز هذه المصادر بأن طاقة النيوترونات الصادرة منها تكون ذات قيمة محددة بعكس مصادر الراديوم بريليوم التي يكون طيف النيوترونات فيها مستمرا. ويمكن استخدام نظير الصوديوم 24 (${}^{24}_{11}Na$) كمصدر لإشعاعات جاما حيث تبلغ طاقة إشعاعات جاما الصادرة منه 2.76 ميغا إلكترون فولت. فعند وضع واحد جرام من الصوديوم 24 مع قطعة كبيرة من البريليوم 9 دون طحن (نظرا للقدرة العالية لإشعاعات جاما على الاختراق) يمكن الحصول منه على مصدر نيوتروني مردوده (أي شدته) حوالي $10^{6}$ نيوترون/ثانية، وطاقة النيوترونات المنبعثة منه حوالي 1.0 ميغا إلكترون فولت.

## هـ معجلات الجسيمات المشحونة كمصادر للنيوترونات

**Particle accelerators as neutron sources**

يمكن الحصول على نيوترونات ذات طاقة محددة وذلك بقذف بعض النوى الخفيفة بالجسيمات المشحونة والمعجلة في معجل حتى طاقة معينة طبقا لبعض التفاعلات التالية:

$${}^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{2}He + n + 3.29\ MeV$$

$${}^{1}_{1}H + {}^{2}_{1}Li \longrightarrow {}^{7}_{4}Be + n - 1.65\ MeV$$

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \longrightarrow ^{4}_{2}He + n + 17.6\ MeV$$

$$^{2}_{1}H + ^{12}_{6}C \longrightarrow ^{13}_{7}N + n - 0.26\ MeV$$

$$^{2}_{1}H + ^{9}_{4}Be \longrightarrow ^{10}_{5}B + n + 4.35\ MeV$$

وهكذا، فإنه يمكن اختيار التفاعل المناسب للحصول على النيوترونات ذات الطاقة المحددة. وبتغيير طاقة الجسيمات المعجلة يمكن تغيير طاقة النيوترونات للقيمة المطلوبة. وعموما، يستخدم التفاعل الثالث في عمل مصادر النيوترنات المعروفة باسم مولدات النيوترونات (neutron generators) . ولهذا الغرض يتم تعجيل الديوترونات لطاقة تصل إلى 150 كيلو إلكترون فولت ويقذف بها هدف من التريتيوم فتنبعث النيوترونات بطاقة 14.1 ميغا إلكترون فولت. ويمكن الحصول من مثل هذا المصدر على تدفق نيوتروني (neutronflux) تصل شدته إلى حوالي $10^{10} - 10^{12}$ نيوترون/ثانية. سم$^2$.

### و – المفاعلات النووية The nuclear reactors

تعتبر المفاعلات النووية أقوى مصادر النيوترونات على الإطلاق حيث يمكن أن تتراوح كثافة النيوترونات داخل المفاعلات بين $10^{13}$ ، $10^{19}$ نيوترون /ثانية.سم$^2$. وتنتج النيوترونات في المفاعلات عن انشطار نوي اليورنيوم والبلوتونيوم نتيجة حدوث التفاعلات المتسلسلة داخله. وتجدر الإشارة إلى أن طيف النيوترونات داخل المفاعل يتراوح ما بين النيوترونات الحرارية والسريعة.

## 3-5-2 التفاعل المتبادل بين النيوترونات والمادة

يختلف التفاعل بين النيوترونات والمادة اختلافا كاملا بالمقارنة بتفاعل الجسيمات المشحونة أو إشعاعات جاما. فالنيوترونات تفقد طاقتها نتيجة تفاعلها مع النواة فقط. ويعتبر التشتت المرن وغير المرن أهم السبل التي يفقد خلالها النيوترون طاقته. ويعتبر التشتت المرن على النوى الخفيفة أهم وسيلة لفقد طاقة النيوترونات وتبطيئها. أما التشتت غير المرن على النوى المتوسطة والثقيلة فلا يلعب دورا هاما في فقد

طاقة النيوترون إلا بالنسبة للطاقات الكبيرة (أكبر من ميغا إلكترون فولت).

### 3–5–3 التشتت المرن للنيوترونات

**The neutron elastic scattering**

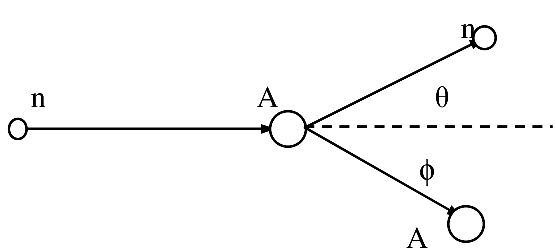
عند سقوط نيوترون طاقته $E_0$ على نواة عددها الكتلي A ينحرف النيوترون عن مساره ويفقد جزءا من طاقته بفعل القوي النووية. فإذا لم تتغير الطاقة الداخلية للنواة (أي عندما يحدث تغير في طاقتها الحركية فقط) يسمى هذا التشتت بالتشتت المرن أو الاستطارة المرنة شكل (3–11).

وباستخدام قانوني بقاء الطاقة والزخم يمكن إيجاد طاقة النيوترون بعد التشتت كالآتي:

$$E = E_0 \left( A^2 + 2A \cos \phi + 1 \right) / (A + 1)^2 \qquad (3\text{-}40)$$

حيث E هي طاقة النيوترون بعد التشتت، $\phi$ هي زاوية التشتت في مجموعة إحداثيات مركز الثقل، وهي مرتبطة بزاوية التشتت $\theta$ في مجموعة الإحداثيات المعملية بالعلاقة التالية:

$$\cos \theta = (1 + A \cos ) / ( A^2 + 2 A \cos \phi + 1 ) \qquad (3\text{-}41)$$




شكل (3–11)
التشتت المرن للنيوترونات

وتبين العلاقة (3−40) أن طاقة النيوترون بعد التشتت تكون أقل ما يمكن للمادة نفسها إذا كانت زاوية التشتت = $180^{\circ}$ ( أي ارتداد النيوترون للخلف تماما) حيث أن جيب تمام 180 يساوي (−1). عندئذ تصبح طاقة النيوترون بعد التشتت هي:

$$E = E_0 \, ( A^2 - 2A + 1 ) / ( A + 1 )^2 \qquad (3\text{-}42)$$

كذلك، يتضح أنه إذا كانت المادة التي تشتت عليها النيوترونات هي الهيدروجين (A = 1) فإنه عند التشتت للخلف تكون طاقة النيوترون E مساوية للصفر. أي أن النيوترون في هذه الحالة يمنح كل طاقته لنواة الهيدروجين ويتوقف.

وهكذا يفقد النيوترون طاقة أكبر بعد التشتت كلما كانت زاوية التشتت كبيرة. وبالنسبة للزاوية المعينة تزداد قيمة الطاقة التي يفقدها النيوترون في التصادم الواحد كلما انخفض العدد الكتلي للنواة التي يحدث التشتت المرن عليها. لذا، تعتبر المواد المكونة من الهيدروجين أو التي تحتوي على نسبة كبيرة منه في تكوينها أفضل المهدئات للنيوترونات (neutron moderators). وهكذا، يمكن أن يفقد النيوترون جزءا كبيرا أو صغيرا من طاقته في التصادم الواحد. ويستخدم في النواحي العملية قيمة أخرى تعرف باسم متوسط لوغاريتم انخفاض الطاقة في التصادم الواحد، أو الانخفاض اللوغاريتمي المتوسط للتصادم الواحد $\zeta$. ويعرف الانخفاض اللوغاريتمي المتوسط كالآتي:

$$\zeta = \overline{\ln E_0 - \ln E} = \overline{\ln ( E_0 / E )} \qquad (3\text{-}43)$$

وبحساب هذه القيمة باستخدام العلاقة (3−40) نجد أن:

$$\zeta = 1 - [( A-1)^2 / 2A] \ln [(A+1) / (A-1)] \qquad (3\text{-}44)$$

وبالنسبة للهيدروجين حيث A = 1 ، نجد أن $\zeta = 1$. وهذا يعني أن طاقة النيوترون تنخفض في المتوسط بعد كل تصادم بمقدار 2.71 مرة ( أي مايساوي الأساس اللوغاريتمي الطبيعي ). أي أن طاقة النيوترون بعد كل تصادم تصبح في المتوسط مساوية 37% من طاقته قبل التصادم.

وبمعرفة متوسط الانخفاض ζ للمادة يمكن إيجاد متوسط عدد التصادمات اللازمة لتخفيض طاقة النيوترون من القيمة الأصلية للقيمة المطلوبة. فإذا كانت القيمة الأصلية لطاقة النيوترون قبل التصادم هي 2 ميغا إلكترون فولت على سبيل المثال ويلزم تهدئته حتى طاقة مقدارها 0.025 إلكترون فولت ( أي طاقة النيوترونات الحرارية ) يكون متوسط عدد التصادمات المطلوبة هو:

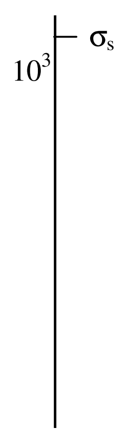
$$N = \ln ( E_0 / E ) / \zeta$$

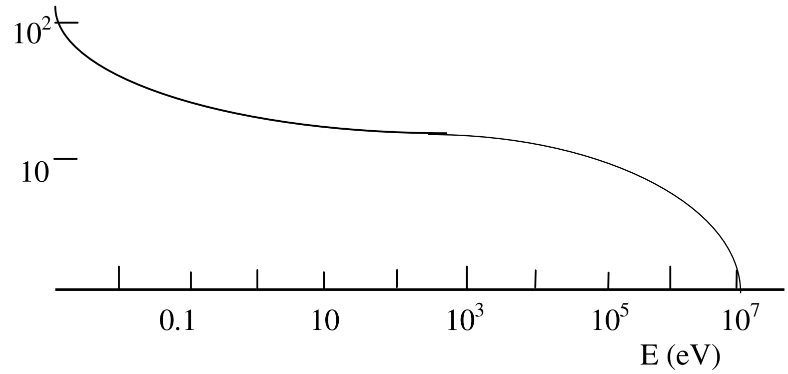
$$= [\ln(2 \times 10^6 / 0.025)] / \zeta$$

أي أنه بالنسبة للهيدروجين يكون متوسط عدد التصادمات المطلوبة هو:

$$N = 18.2 / 1 = 18.2$$

لذلك، يعتبر الهيدروجين من أفضل المهدئات لأن متوسط عدد التصادمات اللازمة لتهدئة النيوترونات السريعة وتحويلها إلى نيوترونات حرارية محدود ( حوالي 18– 19 تصادما). ولكن يجب ملاحظة أن احتمال تصادم النيوترون بالهيدروجين الموجود في الحالة الغازية احتمال ضعيف للغاية وذلك لأن عدد ذرات الهيدروجين في وحدة الحجم من الغاز عدد صغير. كما يجب أن يوضع في الحسبان اختلاف قيمة المقطع العرضي $\sigma_s$ لتشتت النيوترونات باختلاف المادة، وكذلك باختلاف طاقة النيوترونات. ويبين الشكل (3–12) كيفية تغير المقطع العرضي $\sigma\sigma_s$ للتشتت المرن كدالة من طاقة النيوترونات بالنسبة للهيدروجين. وأخيرا فإنه لكي يكون المهدئ من النوع الجيد يجب أن يكون المقطع العرضي لامتصاص النيوترونات في هذه المادة أصغر ما يمكن حتى لا تتعرض النيوترونات للامتصاص دون التهدئة. وحتى يمكن أخذ جميع هذه العوامل في الحسبان تستخدم كميتان جديدتان لتحديد خصائص المادة المهدئة للنيوترونات وهما:






شكل (3−12)

تغير المقطع العرضي $\sigma\sigma_s$ من طاقة النيوترونات بالنسبة للهيدروجين

### أ− القدرة على التهدئة The slowing down power (SDP)

هي عبارة عن حاصل ضرب متوسط لوغاريتم انخفاض الطاقة بالتصادم الواحد للمادة المعينة في عدد ذرات هذه المادة في وحدة الحجوم n في المقطع العرضي للتشتت $\sigma_s$ لهذه المادة، أي أن:

$$SDP = \zeta\, n\, \sigma_s$$

$$= \zeta\, \sigma_S\, (N_a\, \rho / A)$$

$$= \zeta\, \Sigma_s \qquad (3\text{-}45)$$

حيث $N_a$ عدد أفوغادرو، $\rho$ كثافة المادة، A عددها الكتلي. وتسمى القيمة $\Sigma_s = n\, \sigma_s$ بالمقطع العرضي الجهري للتشتت ( أو الاستطارة) (Scattering macroscopic cross - section) وهو عبارة عن احتمال تشتت النيوترون على 1سم$^3$ من المادة.

### ب− نسبة التهدئة The moderating ratio (MR)

هي عبارة عن حاصل قسمة القدرة على التهدئة على المقطع العرضي الجهري للامتصاص، أي أن:

$$MR = \zeta n \sigma_s / n \sigma_a$$
$$= \zeta \Sigma_s / \Sigma_a$$
$$= \zeta \sigma_s / \sigma_a$$

حيث $\sigma_a$ هو المقطع العرضي لامتصاص النيوترون داخل هـذه المادة، $\Sigma_a$ المقطع العرضي الجهري للامتصاص. أي أن نسبة التهدئـة هي عبارة عن نسبة النيوترونات المهدأة إلى النيوترونات الممتصة فـي المادة.

## 3-5-4 التشتت غير المرن للنيوترونات

**The neutron inelastic scattering**

عند حدوث تشتت غير مرن للنيوترونات تنتقل النواة التي حـدث عليها التشتت من الحالة الأرضية إلى الحالة المثارة. ولا يحـدث هـذا النوع من التشتت إلا إذا كانت طاقة النيوترون مساوية أو أكبر من قيمة حدية معينة. لذا، فإن التشتت غير المرن لا يحدث إلا للنيوترونات التي تزيد طاقتها على عدة عشرات بل ربما عدة مئات من الكيلو إلكتـرون فولت. وبذلك، لا يلعب التشتت غير المرن دورا مهما في عملية تهدئـة النيوترونات عند الطاقات الصغيرة.

## 3-5-5 الأسر النيوتروني The neutron capture

يحدث في العديد من العناصر أن تأسر نواة العنصـر نيوترونـا مكونة بذلك نواة نظير جديد. وتتكون هذه النواة الجديدة عادة في الحالة المثارة. وتعتمد قيمة المقطع العرضي للأسر $\sigma_c$ (capture cross-section) على طاقة النيوترون وتزداد زيادة كبيرة عند قيم معينة للطاقة تختلـف من نواة لأخرى. ويعرف الأسر عند هذه القيم بالأسـر أو الامتصـاص التجاوبي (resonance absorption). وتعود النواة المتكونـة مـن الحالـة المثارة إلى الحالة الأرضية مصدرة بذلك إشعاعات جاما. لذلك، يعـرف أحيانا هذا النوع من الامتصاص بالأسر الإشـعاعي (radiative capture)

أو بالتفاعل نيوترون، جاما (n , γ). ويمكن حساب قيمة المقطع العرضي للأسر التجاوبي $\sigma_c$ نظريا وقد وجد أنه يمكن التعبير عنه بالعلاقة التالية:

$$\sigma_c = C / [ (E-E_r)^2 + b] \qquad (3\text{-}47)$$

حيث C ، b ثوابت تعتمد على نوع النواة وحالتها المثارة، أما E فهي طاقة النيوترون الساقط، $E_r$ هي طاقة النيوترون التي يحدث عندها التجاوب (resonance energy). كذلك وجد أنه بالنسبة للنيوترونـــات ذات الطاقات الحرارية يتناسب المقطع العرضي للأسر التجاوبي $\sigma_c$ تناســبا عكسيا مع سرعة هذه النيوترونات v ، أي أن:

$$\sigma_c = 1 / E^{1/2v} = 1 / v \qquad (3\text{-}48)$$

حيث: v هي سرعة النيوترونات. وتجدر الإشارة إلى أن منطقة الطاقات الحرارية تكون سابقة لمنطقة الطاقات التي يحدث عندها الأسر التجاوبي بالنسبة لغالبية العناصر باستثناء عنــصر الكـــــادميوم $_{48}Cd$. فبالنسبة لهذا العنصر يحدث الامتصاص التجاوبي بالقرب من الطاقـــات الحرارية. ويتميز المقطع العرضي للامتصاص التجاوبي $\sigma_c$ بأن قيمتـــه عالية للغاية. لذلك، يستخدم هذا العنصر كمادة عاليـــة الفعاليـــة لعمـــل الحواجز الواقية من النيوترونات الحرارية.

وعند الطاقات العالية للنيوترونات يمكن أن تفتح قنوات جديـــدة للتفاعل. فبعد امتصاص النيوترون يمكن أن تصدر النواة المركبة أحـــد الجسيمات المشحونة الثقيلة مثل جسيمات ألفا أو البروتونات أو غيرها، وذلك حسب طاقة النيوترونات ونوع النواة. ومن أمثلة هذه التفـــاعلات بين النيوترونات السريعة والنوى مع إصدار جسيمات مشـــحونة ثقيلـــة تفاعل النيوترونات السريعة مع النيتروجين 14 ، الذي يحدث، عادة، في الغلاف الجوي المحيط بالكرة الأرضية والذي يمثل النيتروجين حـــوالي 80 % من مكوناته.

$$^{14}_{7}N + n \longrightarrow {}^{14}_{6}C + P$$

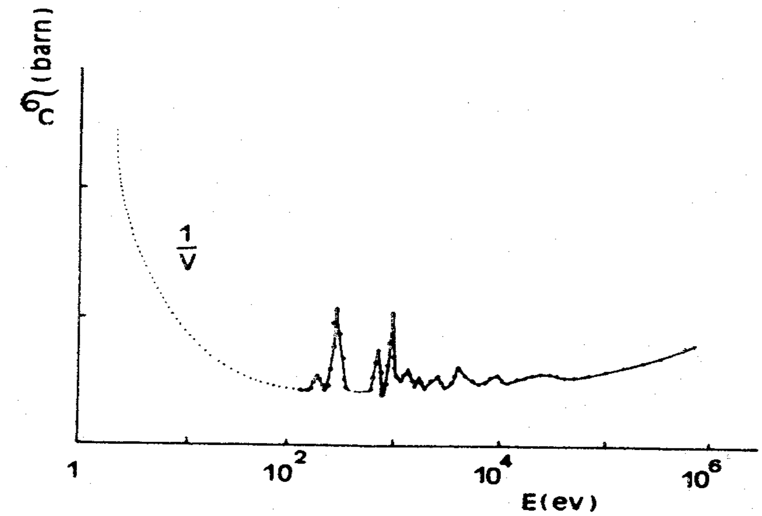
وتجدر الإشارة إلى أن هذا التفاعل يحدث في الغـــلاف الجـــوي للكرة الأرضية عندما تصطدم النيوترونات السريعة القادمة من الأشـــعة

الكونية مع نوى النيتروجين، فيتكون بذلك نظير الكربـــون 14 المشـــع لجسيمات بيتا طبقا لأسلوب التفكك التالي:

$$^{14}_{6}C \xrightarrow{\text{5568 سنة}} {}^{14}_{7}N + \beta^{-} + \nu\acute{}$$

وطبقا لقوانين التوازن الإشعاعي ( راجع الفصل الثاني ) فإنـــه بعد مرور ما يقرب من عشرة أعمار نصـــفية للكربـــون ( أي حـــوالي 55680 سنة ) من بدء التكوين يحدث التوازن بين التكـــوين والتفكـــك فيصبح عدد ذرات الكربون 14 ثابتا في الجو. وحيث أن الكربـــون 14 يوجد في الجو على شكل غاو ثاني أكسيد الكربون، فـــإن النســـبة بـــين $^{14}_{6}CO_2$ ، $^{12}_{6}CO_2$ تكون ثابتة في الجو، وبالتالي في جميـــع الكائنـــات الحية. وبمجرد موت الكائن الحي فإنه يتوقف عن استهلاك ثاني أكســـيد الكربون من الجو . عندئذ تبدأ نسبة $^{14}_{6}C$ الموجودة فـــي جســـمه فـــي التناقص نتيجة للتفكك الإشعاعي. وتستخدم هذه الحقيقـــة فـــي عمليـــات التأريخ وتحديد أعمار الاكتشافات الأثرية ذات الأصل الحي.

ويوضح شكل (3−13) كيفية تغير المقطع العرضي للامتصاص بزيادة طاقة النيوترون حيث تتضح عليه المنطقـــة $( \sigma_c = 1/v )$ للطاقـــات الحرارية ثم منطقة الأسر التجاوبي. وعند الطاقات العالية يزداد المقطع العرضي بسبب فتح قنوات جديدة للتفاعل بين النيوترون والمـــادة مـــع إصدار الجسيمات المشحونة الثقيلة.




**شكل (٣ - ١٣)**

تغير المقطع العرضي للامتصاص بزيادة طاقة النيوترون

## 3-5-6 المقطع العرضي الكلي للنيوترونات وتعيينه عمليا

**The total neutron cross – section and its determination**

المقطع العرضي الكلي $\sigma_t$ هو عبارة عن مجموع المقاطع العرضية للتشتت المرن والامتصاص، أي أن:

$$\sigma t = \sigma s + \sigma c \qquad (3\text{-}49)$$

وتجدر الإشارة إلى صعوبة التحديد العملي لكل من $\sigma_s$، $\sigma_c$ كل على حدة، في حين أنه يمكن تحديد المقطع العرضي $\sigma_t$ بسهولة. ويمكن تنفيذ ذلك بوضع سمك معين من المادة المطلوب تعيين المقطع الكلي لها بين مصدر النيوترونات والكاشف النيوتروني ( يجب أن تكون حزمة النيوترونات الخارجة من المصدر متوازية ) ثم يقاس معدل العد في الكاشف في وجود المادة وبدونها. ومن هاتين القراءتين يمكن تحديد المقطع الكلي للنيوترونات لهذه المادة باستخدام العلاقة المعروفة التالية:

$$N = N_0\, e^{-n\, \sigma t\, x} = N_0\, e^{-\Sigma \mu t\, x}$$

حيث: N هي معدل العد عند وجود المادة بين الكاشف والمصدر، $N_0$ هو المعدل بدون المادة، n عدد الذرات في 1 سم$^3$ من المادة، x هو سمك هذه المادة. وبذلك يمكن اعتبار المقدار $n\,\sigma_t$ بمثابة معامل الامتصاص الخطي للنيوترونات، أي أن:

$$\mu_t = n\,\sigma_t$$

## 6-3 أسئلة ومسائل للمراجعة

1- اشرح كيف تنتقل الطاقة من جسيم ألفا إلى المادة، وقارن بينها وبين انتقال الطاقة من الإلكترون إلى المادة.

2- عرف المدى والتبعثر للجسيمات الثقيلة وقارنهما بنظيريهما للإلكترونات.

3- ما هو التأين النوعي، وكيف يرتبط بقدرة الإيقاف؟، وما هي القيم التقريبية للتأين النوعي لكل من الجسيمات الثقيلة والإلكترونات وإشعاعات جاما؟

4- عرف قدرة الإيقاف، وما هي العلاقة بينها وبين المدى؟ قارن بين قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا والبرتونات.

5- ارسم مسار جسيم بيتا في المادة وعلل ما رسمت.

6- ما هو دور التشتت الارتدادي لجسيمات بيتا؟، وما سببه؟، وكيف يمكن تلافيه؟.

7- كيف تفقد الإلكترونات طاقتها في المادة عند الطاقات المختلفة؟.

8- ما هو قانون الامتصاص للإلكترونات في المادة؟. عرف معامل الامتصاص. وما هي العوامل التي تؤثر في قيمته؟. عرف السمك النصفي. وما هي وحداته؟.

9- كيف تفقد إشعاعات جاما والأشعة السينية طاقاتها في المادة؟.

10- اشرح قانون امتصاص إشعاعات جاما في المادة، وما هي العوامل المؤثرة على معامل الامتصاص الخطي؟.

11- كيف يتأثر معامل الامتصاص لإشعاعات جاما بالعدد الذري لمادة الامتصاص؟، وما هي الصيغ المختلفة لهذا المعامل؟.

12- عرف التأثير الكهروضوئي. كيف يعتمد مقطعه العرضي على العدد الذري للمادة الممتصة وعلى طاقة الإشعاعات؟. وما هي الاتجاهات المفضلة لانطلاق الإلكترون الكهروضوئي؟.

13- عرف تأثير كومبتون. كيف يعتمد مقطعه العرضي على العدد الذري للمادة وعلى طاقة الإشعاعات؟، وما هي الاتجاهات المفضلة لانطلاق إلكترون كومبتون؟.

14- ما معنى إنتاج الأزواج؟، وكيف يعتمد مقطعه على كل من طاقة الإشعاعات ونوع المادة؟.

15- عرف أثر موسباور.

16- اذكر بعض مصادر النيوترونات واشرح أهم الفروق بينها.

17- كيف تفقد النيوترونات طاقها عند السقط على المادة؟.

18- اشرح التشتت المرن للنيوترونـــات، وكيـــف يســـتخدم كمهدئ؟

19- عرف كلا من متوسط انخفاض الطاقـــة فـــي التصـــادم الواحد والقدرة على التهدئة، ونسبة التهدئة.

20 ما هي الشروط الواجب توفرها في المـــادة المســـتخدمة كمهدئ للنيوترونات؟.

21- عرف التشتت غير المـــرن للنيوترونـــات، ومـــا دوره كمهدئ للنيوترونات؟.

22- ما هو الأسر النيوتروني؟، وكيف يعتمد مقطعه العرضي على طاقة النيوترونات؟

23- عرف الامتصاص الكلي للنيوترونات وكيف يمكن تعيين مقطعه عمليا؟.

24- احسب قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا فـــي الألمونيـــوم إذا كانت العلاقة بين الطاقة والمدى للبروتونات كالتالي:

| $E_P$ (MeV) | 1 | 1.5 |
|---|---|---|
| $R_P$ (gr/cm$^2$) | 0.00343 | 0.0069 |

(الجواب 580 ميغا إلكترون فولت/غم سم$^2$)

25- عند دراسة امتصاص جسيمات بيتا الصادرة من نظيـــر الفسفور 32 في مادة الألمونيوم كانت النتائج كالمبينة في الجدول. عين

| 900 | 800 | 700 | 600 | 500 | 400 | 300 | 200 | 100 | صفر | سمك |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| الألمونيوم (ملجم/سم$^2$) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| معدل العد | 1000 | 600 | 375 | 165 | 65 | 18 | 5.5 | 5 | 4 | 4 |

من هذه البيانات مدى الجسيمات في الألمونيوم والسمك النصفي.

26- من المعروف أن كل جرام من الفحم الخشبي المتكون حديثا يحدث 16.1 تفكك بيتا في الدقيقة نتيجة لوجود الكربون 14 بنسبته الثابتة. وبالكشف عن قطعة أثرية من الخشب كان معدل العد في الكاشف 7 تفككات في الدقيقة لكل 20 جرام من هذا الخشب الأثري. عين عمر هذه القطعة الأثرية، علما بأن العمر النصفي للكربون 14 هو 5570 سنة.

27- عند دراسة توهين إشعاعات جاما الصادرة من نظير الصوديوم 24 ( طاقة 2.76 م إف) في كل من $_{13}Al$ ، $_{50}Ti$ ، $_{82}Pb$ كانت النتائج كالمبينة في الجدول التالي:

| $_{82}Pb$ | | $_{50}Ti$ | | $_{13}Al$ | |
|---|---|---|---|---|---|
| السمك(سم) | معدل العد | السمك(سم) | معدل العد | السمك(سم) | معدل العد |
| صفر | 1000 | صفر | 1000 | صفر | 1000 |
| 1 | 620 | 1 | 923 | 2.5 | 788 |
| 2 | 384 | 2 | 586 | 5.0 | 622 |
| 3 | 238 | 3 | 449 | 7.5 | 420 |
| 4 | 147 | 5 | 263 | 10.0 | 387 |
| 6 | 57 | 7 | 154 | 12.5 | 305 |
| 10 | 8 | 10 | 69 | 15.0 | 240 |
| | | 16 | 14 | 20.0 | 50 |
| | | | | 30.0 | 58 |
| | | | | 40.0 | 22 |

أوجد من هذه النتائج معامل التوهين $\mu$ ( سم$^{-1}$ ) بيانيا. وأوجد السمك النصفي لكل مادة.